



TESIS - TE142599

**DESAIN STRATEGI PENGATURAN TORSI  
HYBRID ELECTRIC VEHICLE (HEV) DENGAN  
MEMAKSIMALKAN KERJA BRUSHLESS DC MOTOR  
MENGUNAKAN FUZZY-PI CONTROL**

YOSI RIDUAS HAIS  
2215202005

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Ir. Mochammad Rameli  
Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



TESIS - TE142599

**DESAIN STRATEGI PENGATURAN TORSI  
HYBRID ELECTRIC VEHICLE (HEV) DENGAN  
MEMAKSIMALKAN KERJA BRUSHLESS DC MOTOR  
MENGUNAKAN FUZZY-PI CONTROL**

YOSI RIDUAS HAIS  
2215202005

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Ir. Mochammad Rameli  
Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN  
DEPERTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017

## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Yosi Riduas Hais  
NRP. 2215202005

Tanggal Ujian : 08 Juni 2017  
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:

1. Dr. Ir. Mochammad Rameli (Pembimbing I)  
NIP: 1954 1227 1981 0310 02

2. Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT (Pembimbing II)  
NIP: 1957 0424 1985 0210 01

3. Prof.Dr.Ir. Muhammad Nuh, DEA (Penguji I)  
NIP: 1959 0617 1984 0310 02

4. Prof.Dr.Ir. Achmad Jazidie, M.Eng (Penguji II)  
NIP: 1959 0219 1986 1010 01

5. Dr. Trihastuti Agustinah, ST.,MT (Penguji III)  
NIP: 1968 0812 1994 0320 01

Dekan Fakultas Teknologi Elektro



Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.  
NIP. 197002121995121001

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“DESAIN STRATEGI PENGATURAN TORSI HYBRID ELECTRIC VEHICLE (HEV) DENGAN MEMAKSIMALKAN KERJA BRUSHLESS DC MOTOR MENGGUNAKAN FUZZY-PI CONTROL”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2017



Yosi Riduas Hais

NRP. 2215202005

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DESAIN STRATEGI PENGATURAN TORSI HYBRID ELECTRIC VEHICLE (HEV) DENGAN MEMAKSIMALKAN KERJA BRUSHLESS DC MOTOR MENGGUNAKAN FUZZY-PI CONTROL

Nama mahasiswa : Yosi Riduas Hais  
NRP : 2215202005  
Pembimbing : 1. Dr. Ir. Mochammad Rameli  
2. Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT

## ABSTRAK

HEV merupakan kendaraan dengan sumber energi penggerak minimal dua sumber yang berbeda. Motor bakar dan motor listrik adalah kombinasi yang umum digunakan. Salah satu permasalahan HEV yaitu bagaimana menjaga performa kendaraan tetap memenuhi spesifikasi yang ditentukan dengan konsumsi energi yang ekonomis untuk berbagai perubahan kondisi jalan. Performa kendaraan berkaitan dengan pengaturan torsi HEV. Pengaturan torsi HEV merupakan pengaturan distribusi torsi motor bakar dan motor listrik. Sehingga diperlukan strategi pengaturan torsi motor bakar dan motor listrik.

Strategi pengaturan torsi HEV dirancang berdasarkan tipenya, dalam penelitian ini menggunakan tipe paralel. Torsi *prime mover* diberikan oleh motor DC (emulator motor bakar) dan torsi bantu diberikan oleh *Brushless DC Motor* (BLDCM). Kedua penggerak ini terhubung pada satu *shaft* (poros) roda. Mode operasi gabungan aktif ketika adanya gangguan torsi luar. Gangguan torsi luar ini diberikan oleh gaya yang bekerja pada HEV berdasarkan sudut kemiringan jalan. Pada mode operasi ini, torsi emulator dijaga konstan, kemudian kekurangan torsi yang dibutuhkan diberikan oleh BLDCM. Kekurangan torsi dihitung menggunakan torsi distributor. Torsi distributor dirancang dari *invers* model beban. Nilai kekurangan torsi tersebut menjadi referensi BLDCM. Pada BLDCM dilakukan pengaturan torsi menggunakan kontroler PI, dimana parameter P dan I selalu di-*update* menggunakan kontroler *fuzzy*, input kontroler *fuzzy* merupakan perubahan nilai referensi torsi.

Dari hasil pengujian, HEV dapat berakselerasi (0-60 km/jam) dalam waktu  $\leq 5$  detik dan respon kecepatan dapat mengikuti model referensi dengan nilai *error steady state* sebesar 0,0316 km/jam dan (*Relative Root Mean Square Error*) RRMSE respon kecepatan  $< 2\%$ . Pada kondisi akselerasi dengan memberikan gangguan torsi luar performa kendaraan tetap mengikuti kurva referensi dengan nilai *error steady state* 0,1506 km/jam dan RRMSE respon kecepatan sebesar  $< 2\%$ . Strategi kontrol torsi HEV yang diterapkan dengan cara memaksimalkan kerja BLDCM menggunakan *fuzzy*-PI kontroler dapat bekerja dengan baik.

Kata kunci: *HEV, BLDCM, Fuzzy-PI*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# **DESIGN OF TORQUE CONTROL STRATEGY FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLE WITH MAXIMUM WORK BRUSHLESS DC MOTOR USING FUZZY-PI**

By : Yosi Riduas Hais  
Student Identity Number : 2215202005  
Supervisor(s) : 1. Dr. Ir. Mochammad Rameli  
2. Ir. Rusdhianto Effendie AK, MT

## **ABSTRACT**

Hybrid Electric Vehicle (HEV) is vehicle with least two energy sources, such as Internal Combustion Engine (ICE) and Brushless DC Motor (BLDCM). One of HEV's problems is how to keep the vehicle's performance in compliance with the desired specifications with low energy consumption for various road condition changes. Vehicle performance is related to torque control of HEV. Torque control of HEV is the regulation of torque distribution between ICE and electric motor. So necessary, the strategy of torque control ice and electric motor.

Torque control strategy for HEV designed based on the type, In this study using parallel type. The main torque source is given of DC motor and torque auxiliary given of brushless DC Motor (BLDCM). Both torque sources connected to a single wheel axle. The combined operating mode is active when there is external torque disturbances. This external torque disturbance is given by force on HEV based on the angle of the road. In operation mode, torque of emulator made constant. Then the shortage of torque required by BLDCM. The required torque is calculated using the distributor torque. Torque distributor designed based on inverse load model. The torque value becomes a reference for BLDCM. Torque control on BLDC using PI controller, With parameter P and I always changed using fuzzy controller. Fuzzy controller input is a change in the reference value of torque.

From the test results, HEV can accelerate (60 km/h) within  $\leq 5$  seconds and the speed response can follow the reference model with error value 0,0316 km/h and (Relative Root Mean Square Error) RRMSE speed response  $< 2\%$ . Acceleration conditions by providing external torque disturbance, vehicle performance still follows the reference curve with error value 0,1506 km/h and RRMSE speed response  $< 2\%$ . The torque control strategy in HEV implemented by maximizing BLDCM work using fuzzy-PI control can operate well.

Keywords: HEV, BLDCM, Fuzzy-PI

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan judul “**Desain Strategi Pengaturan Torsi *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) dengan Memaksimalkan Kerja Brushless DC Motor Menggunakan Fuzzy-PI Control**”. Tesis ini disusun untuk memenuhi syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik (MT) di Pascasarjana Teknik Elektro ITS.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Moch. Rameli selaku Pembimbing I dan Bapak Ir. Rusdhianto Effendie AK. MT selaku Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan bantuan kepada penulis sampai Tesis ini selesai. Penyelesaian Tesis ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis juga mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak/Ibu staf pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS.
2. Kedua orang tua dan mertua serta saudaraku yang telah memberikan semangat dan do’a serta kasih sayangnya kepada penulis.
3. Istri tercinta yang selalu memberikan semangat dan sabar mendampingi semasa berjuang dr.Rizki Amelia
4. Rekan-rekan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro ITS, khususnya Bidang Keahlian Teknik Sistem Pengaturan (S2) angkatan 2015.

Penulis menyadari bahwa didalam penyusunan Tesis ini masih banyak terdapat kelemahan dan kekurangan. Penulis mengharapkan saran demi kesempurnaan penulisan Tesis ini. Semoga Tesis ini bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Kontribusi .....	4
1.6 Metodologi Penelitian .....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA .....	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait .....	5
2.2 Teori Dasar .....	11
2.2.1 <i>Hybrid Electric Vehicle</i> [1] .....	11
2.2.2 <i>Brushless DC Motor</i> (BLDCM) [7] .....	14
2.2.3 Motor DC [8] .....	16
2.2.4 <i>Timing Belt</i> dan Perbandingan <i>Gear</i> [9] .....	18
2.2.5 Rem Elektromagnetik [9] .....	20
2.2.6 Kopling Elektromagnetik .....	21
2.2.7 Metode Identifikasi Sistem [10] .....	21
2.2.8 <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE) [9] .....	22
2.2.9 Kontroler <i>Fuzzy</i> [11, 12] .....	23
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM .....	27
3.1 Perancangan Simulator HEV .....	28

3.2	Identifikasi dan Pemodelan BLDCM .....	34
3.3	Perancangan dan Pemodelan Emulator Motor Bakar.....	41
3.4	Perancangan dan Pemodelan Roda Gigi .....	46
3.5	Perancangan dan Pemodelan Beban HEV.....	48
3.6	Model Referensi .....	49
3.7	Perancangan Strategi Pengaturan Torsi HEV .....	50
3.8	Perancangan Simulasi.....	56
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....		59
4.1	Hasil Perancangan Konstruksi Mekanik Simulator HEV .....	59
4.2	Pengujian <i>Self Comutation</i> BLDCM.....	60
4.3	Pengujian Emulator Motor Bakar.....	64
4.4	Pengujian HEV.....	66
4.4.1	Pengujian HEV Kondisi Akselerasi .....	66
4.4.2	Pengujian HEV Dengan Gangguan Torsi Luar .....	67
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....		73
5.1	Kesimpulan.....	73
5.2	Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA.....		75
Lampiran 1. Gambar Rancangan Mekanik Simulator HEV .....		77
Lampiran 2. Gambar Rancangan Elektronik Simulator HEV .....		79
Lampiran 3. Simulasi Simulator HEV dengan Matlab.....		81
RIWAYAT HIDUP .....		83

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Aturan Kerja <i>Hybrid Controller</i> .....	6
Gambar 2.2 Respon Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar .....	7
Gambar 2.3 Distribusi Torsi PHEV .....	7
Gambar 2.4 Strategi Kontrol Torsi PHEV .....	8
Gambar 2.5 Respon Perbandingan FTCS dan LTCS .....	8
Gambar 2.6 Hasil Simulasi Strategi Pengaturan Torsi PHEV .....	9
Gambar 2.7 Rancangan Konseptual DTC BLDCM .....	9
Gambar 2.8 Respon Perbandingan Kontroler <i>Fuzzy</i> dan PI pada BLDCM .....	10
Gambar 2.9 HEV Tipe Seri .....	11
Gambar 2.10 HEV Tipe Paralel .....	12
Gambar 2.11 HEV Tipe <i>Power Split</i> .....	12
Gambar 2.12 Konfigurasi Kumputan Stator .....	14
Gambar 2.13 Kumputan Stator Tiga Fasa dan Rotor BLDCM .....	15
Gambar 2.14 Konfigurasi Fisik Motor DC Paralel .....	17
Gambar 2.15 Konfigurasi <i>Timing Belt</i> dan <i>Gear</i> .....	20
Gambar 2.16 Konstruksi Kopling Elektromagnetik .....	21
Gambar 2.17 Skema Dasar Kontroler <i>Fuzzy</i> .....	23
Gambar 3.1 Diagram blok perancangan konseptual sistem .....	27
Gambar 3.2 Perancangan Konstruksi Mekanik Simulator HEV .....	29
Gambar 3.3 Bentuk Fisik Motor DC .....	30
Gambar 3.4 Bentuk Fisik BLDCM .....	31
Gambar 3.5 Konfigurasi Rem Elektromagnetik .....	31
Gambar 3.6 Kopling Elektromagnetik .....	32
Gambar 3.7 Sinyal Pembacaan Posisi Rotor Menggunakan Sensor <i>Hall Effect</i> .....	33
Gambar 3.8 Skema blok rangkaian <i>logic commutation</i> .....	33
Gambar 3.9 Enam Sinyal Output <i>Logic Commutation</i> dengan Gabungan PWM .....	34
Gambar 3.10 Sinyal <i>Output Power</i> Elektronik dengan Gabungan PWM .....	34
Gambar 3.11 Pengukuran Mutu Induktansi .....	35
Gambar 3.12 Respon Arus Transient dan Kecepatan Hasil Pengukuran .....	41
Gambar 3.13 Blok Diagram Motor Bakar .....	42
Gambar 3.14 Respon Kecepatan Motor Bakar dan Titik Identifikasi .....	43
Gambar 3.15 Respon Torsi dan Kecepatan Pemodelan Motor Bakar .....	44
Gambar 3.16 Blok Diagram Perancangan Emulator Motor Bakar .....	45
Gambar 3.17 Respon Torsi dan Error Torsi Emulator Motor Bakar .....	46
Gambar 3.18 Rancangan Transmisi Gir .....	47
Gambar 3.19 Model Beban Luar HEV .....	49
Gambar 3.20. Blok Diagram Kontrol Torsi BLDCM dengan Kontroler <i>Fuzzy-PI</i> .....	53
Gambar 3.21. <i>Inference Fuzzy Tuner Kp</i> .....	54
Gambar 3.22. <i>Membership Function Tuner Kp</i> .....	54
Gambar 3.23. <i>Inference Fuzzy Tuner Ki</i> .....	54

Gambar 3.24. <i>Membership Function Tuner Ki</i> .....	55
Gambar 4.1 Hasil Perancangan Konstruksi Mekanik HEV .....	59
Gambar 4.2 Sinyal <i>Output</i> Pembacaan <i>Effect Hall</i> .....	60
Gambar 4.3 Sinyal Output Rangkaian <i>Logic Commutation</i> dengan PWM.....	61
Gambar 4.4 Output <i>Power Electronic</i> , (a) <i>line-to-netral</i> , (b) <i>line-to-line</i> .....	61
Gambar 4.5 Karakteristik Output Metode <i>Self Commutation</i> .....	62
Gambar 4.6 Respon <i>Back EMF</i> BLDCM.....	62
Gambar 4.7 Respon Arus BLDCM .....	63
Gambar 4.8 Respon Torsi BLDCM.....	63
Gambar 4.9 Respon Kecepatan BLDCM .....	64
Gambar 4.10 Respon Emulator Motor Bakar (a) Torsi, (b) Kecepatan. ....	65
Gambar 4.11 Respon Emulator Motor Bakar.....	65
Gambar 4.12 Respon Referensi Acuan HEV .....	66
Gambar 4.13 Respon Kecepatan HEV Kondisi Akselerasi.....	66
Gambar 4.14 Respon <i>Error</i> Kecepatan HEV .....	67
Gambar 4.15 Respon Torsi BLDCM.....	67
Gambar 4.16 Respon Kecepatan HEV dengan Uji Gangguan .....	68
Gambar 4.17 <i>Error</i> Kecepatan HEV dengan Uji Gangguan .....	69
Gambar 4.18 Respon Torsi HEV.....	69
Gambar 4.19 Respon Torsi HEV dan Torsi Gangguan.....	70
Gambar 4.20 Respon Pengujian Kecepatan HEV dengan Beban Bervariasi .....	70
Gambar 4.21 Respon <i>Error</i> Kecepatan HEV saat Beban Bervariasi .....	71
Gambar 4.22 Respon <i>Error</i> Kecepatan Emulator Saat Beban Bervariasi.....	71
Gambar 4.23 Respon <i>Error</i> Torsi HEV dan Emulator .....	71



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Perbandingan Model Kendaraan Konvensional dan <i>Hybrid</i> .....	7
Tabel 2.2 Pendekatan Orde ke-n dan Nilai $y_i$ .....	22
Tabel 3.1 Spesifikasi Simulator HEV .....	28
Tabel 3.2 Spesifikasi Motor DC .....	30
Tabel 3.3 Spesifikasi BLDCM .....	31
Tabel 3.4 Data Hasil Pengukuran Arus Input dan Tegangan Output .....	36
Tabel 3.5 Data Hasil Pengukuran <i>Back</i> EMF .....	37
Tabel 3.6 Hasil Pengujian Koefisien Gesek Beban Minimal .....	39
Tabel 3.7 Parameter Motor DC [9] .....	45
Tabel 3.8 Rule Base <i>Tuner</i> Ki .....	56
Tabel 4.1 Hasil Pengujian BLDCM .....	64
Tabel 4.2 Pengujian HEV Saat diberikan Gangguan (Torsi Luar) .....	68

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Gambar Rancangan Mekanik Simulator HEV .....	77
Lampiran 2. Gambar Rancangan Elektronik Simulator HEV .....	79
Lampiran 3. Simulasi Simulator HEV dengan Matlab .....	81

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Seiring berkembangnya teknologi industri otomotif, maka mulai dikembangkan kendaraan *Hybrid Electrical vehiches* (HEV). HEV merupakan penyempurnaan dari *Electrical Vehicles* (EV) yang ramah lingkungan. EV dikembangkan untuk mengatasi permasalahan yang muncul akibat *Internal Combustion Engine* (ICE) pada mesin konvensional. Mesin konvensional menyebabkan polusi udara, berupa gas berbahaya yang dapat merusak lingkungan. Selain itu, bahan bakar yang tidak terbarukan juga semakin berkurang. EV memiliki masalah, seperti jarak tempuh yang pendek, pengisian baterai yang cukup lama dan kurang ekonomis, sehingga HEV menjadi solusi yang perlu dikembangkan [1].

HEV merupakan kendaraan dengan energi penggerak minimal dua sumber yang berbeda [1, 2]. Kombinasi sumber energi yang umum digunakan adalah motor bakar dan motor listrik [1, 2]. Sumber energi HEV dapat berasal dari motor bakar, motor listrik, maupun gabungan keduanya. Kelebihan dari HEV yaitu ketika motor bakar tidak mampu mempertahankan kecepatan, maka motor listrik akan membantu menyuplai kekurangan energi, sehingga konsumsi bahan bakar akan lebih ekonomis dan performa kendaraan juga dapat stabil [1]. Tujuan utama pengembangan HEV adalah untuk memperkecil emisi gas buang kendaraan dan mengoptimalkan efisiensi konsumsi bahan bakar dengan tetap menjaga performa kendaraan [3].

Permasalahan pengaturan torsi kendaraan menjadi topik penelitian pada HEV. Beberapa permasalahan pengaturan torsi HEV diantaranya adalah bagaimana mengatur torsi motor bakar agar beroperasi pada titik kerja optimalnya, sehingga torsi dan kecepatan HEV dapat stabil. Masalah lainnya adalah bagaimana menyusun strategi pengaturan torsi motor bakar dan motor listrik agar dapat berkolaborasi. Beberapa penelitian juga membahas tentang pengaruh pengaturan torsi terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar. Permasalahan dalam pengaturan torsi berkaitan dengan distribusi atau pembagian kerja antara motor bakar dan

motor listrik, ini bertujuan untuk mendapatkan titik operasi kerja maksimal HEV dalam mencapai *set point* kecepatan [2, 3].

Distribusi torsi pada HEV dibedakan berdasar konfigurasi sumber energi penggeraknya [1, 2]. HEV yang dirancang dalam penelitian ini merupakan simulator HEV tipe paralel. Tipe ini memadukan dua buah pembangkit torsi, dimana torsi *prime mover* diasumsikan diberikan oleh motor DC yang dinamakan emulator motor bakar dan torsi bantu diberikan oleh BLDCM. Motor DC digunakan dalam penelitian ini karena pada motor bakar sangat sulit untuk menghitung nilai perubahan torsi [3]. Penggunaan BLDCM sebagai sumber torsi bantu karena beberapa alasan yaitu: daya yang tinggi, ringan, torsi yang besar, efisiensi yang tinggi, mudah untuk dikontrol, *hardware* dan *software* yang sederhana dan pemeliharaan yang mudah [4]. Kedua penggerak ini terhubung pada satu *shaft* (poros) roda. Mode operasi HEV mengatur *prime mover* bekerja secara mandiri atau gabungan. Pada mode operasi gabungan, dimana *prime mover* membutuhkan torsi tambahan dari BLDCM, hal ini menjadi permasalahan yang dibahas pada penelitian ini.

Mode operasi gabungan aktif ketika adanya gangguan torsi luar. Gangguan torsi luar ini diberikan oleh gaya yang bekerja pada HEV berdasarkan sudut kemiringan jalan. Pada mode operasi ini, torsi emulator dijaga konstan, kemudian kekurangan torsi yang dibutuhkan diberikan oleh BLDCM. Kekurangan torsi dihitung menggunakan torsi distributor. Torsi distributor dirancang dari *invers* model beban. Nilai kekurangan torsi tersebut menjadi referensi BLDCM.

Pada pengaturan torsi BLDCM penggerak HEV telah diimplementasikan berbagai metode kontrol, beberapa diantaranya yang telah digunakan yaitu PID dan *fuzzy* kontroler untuk pengaturan torsi [2, 3]. Terdapat kelebihan dan kekurangan dari kedua kontroler ini yang diimplementasikan pada HEV. Kontroler PID yang diterapkan menimbulkan *overshoot* pada respon torsi, namun riak torsi yang ditimbulkan kecil. Sebaliknya penerapan kontroler *fuzzy* menghilangkan *overshoot*, namun menimbulkan riak torsi yang lebih besar [3].

Berdasarkan permasalahan di atas, maka ide dari penelitian ini adalah tentang perancangan dan implementasi strategi pengaturan torsi HEV dengan memaksimalkan kerja BLDCM sebagai penggerak sekunder menggunakan *fuzzy*-

PI *control*. Dengan strategi ini, diharapkan BLDCM mampu menyuplai torsi bantu ke *prime mover* sesuai yang dibutuhkan. Sehingga dapat memberi kontribusi baru tentang strategi pengaturan torsi HEV.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana merancang dan mengimplementasikan strategi pengaturan torsi BLDCM pada HEV saat kondisi akselerasi dan kondisi adanya gangguan, agar respon HEV dapat mengikuti kurva akselerasi yang diberikan.

## 1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan menghasilkan strategi pengaturan torsi BLDCM pada kondisi akselerasi dan kondisi adanya gangguan sehingga dapat meningkatkan kinerja HEV. Tujuan khusus yang ingin dicapai antara lain:

- a. Membuat simulator HEV dengan akselerasi (0 hingga 60 km/jam) dalam waktu  $\leq 12$  detik serta mengikuti kurva referensi akselerasi yang ditentukan.
- b. Mendesain dan mengimplementasikan strategi pengaturan torsi HEV dengan memaksimalkan kerja BLDCM menggunakan *fuzzy-PI control*.
- c. Menjaga performa kendaraan pada kondisi akselerasi serta saat adanya gangguan beban luar berupa kemiringan jalan.

## 1.4 Batasan Masalah

Beragamnya permasalahan yang muncul, maka diperlukan adanya pembatasan masalah. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a. Simulator HEV yang dirancang merupakan tipe paralel, dengan beban kendaraan berupa rem elektromagnetik.
- b. *Prime mover* sebagai penggerak utama merupakan emulator motor bakar menggunakan motor DC.
- c. Sumber daya motor listrik dari sumber tegangan DC konstan.
- d. Simulator HEV dirancang tanpa kondisi *charging* dan *discharging*.

## 1.5 Kontribusi

Kontribusi dari penelitian ini adalah:

- a. Menghasilkan referensi tentang strategi pengaturan torsi HEV pada kondisi akselerasi dan permasalahan kemiringan jalan.
- b. Penelitian sebelumnya [6] telah menggunakan *fuzzy* kontrol untuk pengaturan torsi BLDCM dan pada penelitian [5] menggunakan metode *self comutation* agar motor BLDCM dikendalikan seperti motor DC biasa, sehingga pada penelitian ini diterapkan *self comutation* BLDCM menggunakan kontroler *fuzzy*-PI untuk pengaturan torsi.

## 1.6 Metodologi Penelitian

Proses pengerjaan penelitian ini terdiri dari beberapa tahap, yaitu studi literatur, perancangan konstruksi simulator HEV, indentifikasi parameter penggerak HEV, perancangan dan penerapan kontroler pada simulator HEV, pengujian dan analisa, serta kesimpulan.

- a. Studi Literatur

Tahap ini yaitu mengumpulkan dan mempelajari penelitian-penelitian yang relevan terhadap topik yang diteliti serta dilakukan perbandingan beberapa kajian penelitian sehingga didapatkan fokus topik penelitian.

- b. Perancangan Sistem

Pada tahap ini akan dirancang konstruksi simulator HEV sesuai strategi yang diterapkan, kemudian dilakukan identifikasi parameter penggerak dan beban HEV. Setelah itu merancang strategi kontrol torsi HEV dan motor BLDC dan menerapkan kontroler *fuzzy*-PI.

- c. Pengujian, Analisa Sistem dan Kesimpulan

Dilakukan pengujian terhadap *plant* yang telah dibuat. Dari hasil pengujian dapat diperoleh data yang digunakan untuk menganalisa kinerja HEV. Kesimpulan diperoleh dengan menganalisa data hasil pengujian yang telah dilakukan.



## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Kajian Penelitian Terkait

Beberapa penelitian yang terkait dengan permasalahan yang dibahas sebagaimana dipaparkan pada [2, 3, 5, 6].

##### 2.1.1 *Parallel HEV Hybrid Controller Modeling for Power Managenent* [2]

Objektif kontrol yang ingin dicapai pada penelitian ini yaitu efisiensi konsumsi bahan bakar kendaraan. Hal ini dilakukan dengan cara menghitung nilai optimal distribusi daya antara motor bakar dan mesin listrik. Implementasinya menggunakan simulink Matlab. Adapun tahapan desain kontroler yang dirancang yaitu:

- a. Membuat estimasi kebutuhan daya. Estimasi kebutuhan daya ( $P_{es}$ ) diperoleh dari perkalian torsi estimasi ( $T_{es}$ ) dan kecepatan angular kendaraan ( $W_{es}$ ).

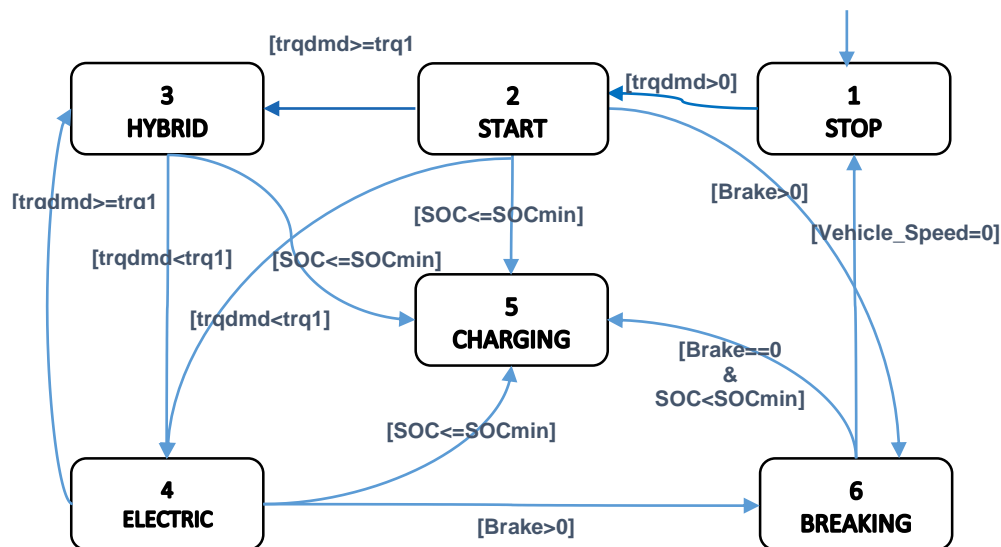
$$P_{es} = T_{es} \times W_{es} \quad (2.1)$$

- b. Menghitung titik kerja terbaik torsi motor bakar dan mesin listrik berdasarkan nilai estimasi kebutuhan torsi.
- c. Menjaga torsi motor bakar pada kondisi konstan selama mungkin dengan cara mengontrol torsi tambahan dari mesin listrik.

Penelitian ini menghasilkan sebuah algoritma kontrol yang disebut dengan *Hybrid Controller*. Desain *hybrid controller* dimulai dengan membaca posisi pedal yang diterjemahkan sebagai *set point* kebutuhan daya yang dibagi menjadi 3 mode operasi yaitu *braking control*, *power split control* dan *charging control*. Kemudian mendesain strategi pembagian kerja motor bakar dan mesin listrik dengan cara membuat aturan kerja kontroler menjadi 6 *state*, dapat dilihat pada Gambar 2.1. dimana *state-state* ini adalah,

- a. Kondisi kendaraan *off*
- b. Kondisi Kendaraan jalan (*start*), dimana hanya motor listrik aktif untuk menyuplai torsi yang dibutuhkan.

- c. Kondisi kendaraan melakukan Akselerasi dan membutuhkan torsi yang besar sementara motor listrik tidak dapat menyuplai daya yang dibutuhkan, sehingga terjadi gaya tarik terhadap motor dan beban. Kontroler akan mengatur torsi dari motor untuk selalu membantu mesin bakar berada pada titik operasi yang efisien.
- d. Kondisi hanya motor listrik yang aktif sementara ICE *off*
- e. Kondisi SOC baterai dibawah  $SOC_{min}$ . Mesin listrik akan menjadi generator dan akan memberikan torsi negatif. Pada kondisi ini kontroler mengatur torsi generator sehingga ICE berada pada titik operasi terbaik (Menggunakan *Engine Map*).
- f. Kondisi *braking*, kontroler menentukan penggunaan *regenetif braking* atau *mechanical braking* atau gabungan keduanya.

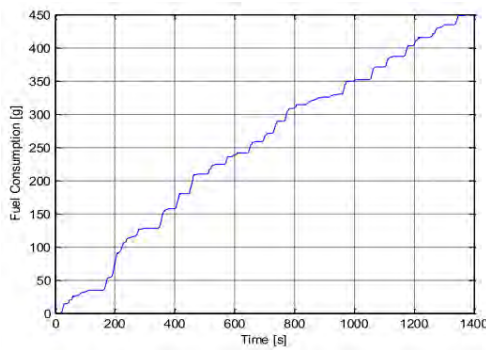


Gambar 2.1 Aturan Kerja *Hybrid Controller*

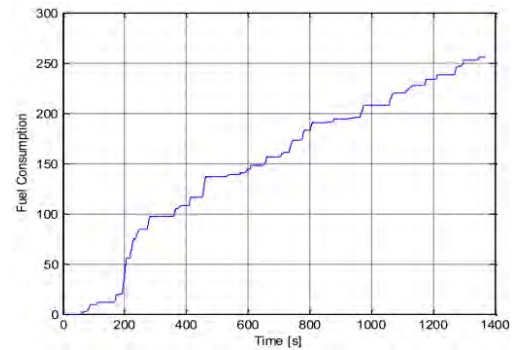
Pengaturan torsi HEV secara keseluruhan menggunakan kontroler PI, dimana parameter PI diperoleh dari hasil *tuning* Matlab yaitu,  $P=1.13$  dan  $I=0.02$ . sehingga didapat waktu akselerasi 13 detik. Dengan strategi dan kontrol yang diterapkan berhasil menghemat konsumsi bahan bakar sebesar 24% dibandingkan kendaraan konvensional. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Model Kendaraan Konvensional dan *Hybrid*

Model	Total Feul Consumption (g)	Jarak Tempuh (Km)
Kovensional	450	11.9893
<i>Hybrid</i>	342	11.9893
<i>Improvement</i>	24%	



(a) Kendaraan Konvensional

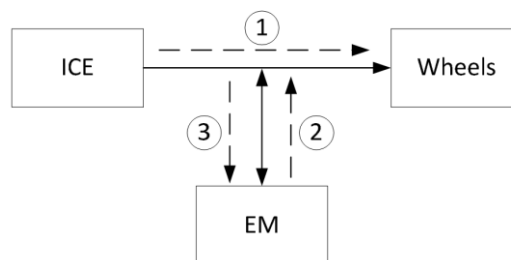


(b) Kendaraan *Hybrid*

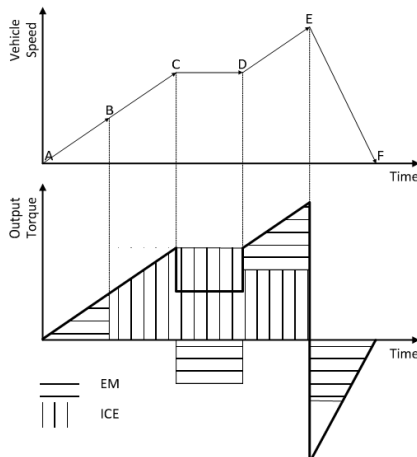
Gambar 2.2 Respon Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar

### 2.1.2 *Torque Control Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles using Fuzzy Logic [3]*

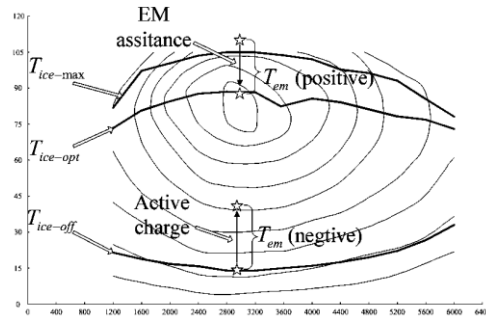
Pada penelitian ini menggunakan *Fuzzy Torque Control Strategy* (FTCS) yang dibuat dengan menggantikan logika boolean dan parameter akurasi dengan logika *fuzzy* dan parameter *fuzzy*. Distribusi torsi PHEV dibagi menjadi tiga *path* (Gambar 2.3) yaitu: (*Path 1*) ketika motor bakar digunakan, torsi dikendalikan secara langsung dari ICE ke *wheels*; (*path 2*) Ketika mesin listrik digunakan sebagai motor, Mesin listrik akan memberikan torsi positif untuk menggerakkan *wheels*; (*path 3*) Ketika mesin listrik digunakan sebagai generator, mesin listrik menyerap torsi untuk mengisi baterai.



Gambar 2.3 Distribusi Torsi PHEV



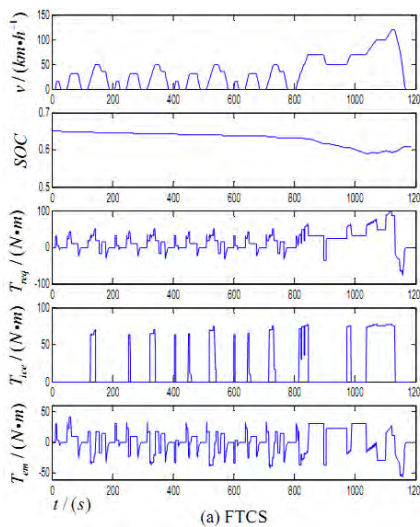
(a) Dasar Mode Operasi PHEV yang diterapkan



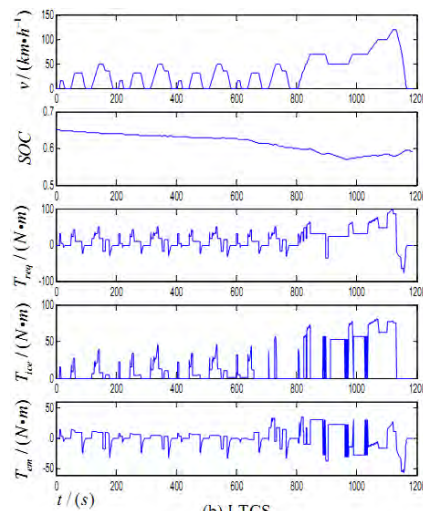
(b) Map Efisiensi ICE

Gambar 2.4 Strategi Kontrol Torsi PHEV

Dari hasil simulasi diketahui bahwa dengan menggunakan strategi pengaturan torsi menggunakan *fuzzy* dapat memperbaiki pemakaian bahan bakar dan mempertahankan kondisi penyimpanan daya pada baterai dalam jangkauan operasi yang lebih efektif. Namun terdapat kekurangan yang ada pada hasil penelitian yaitu efisiensi ICE masih berada pada zona kecepatan rendah. Belum dapat ditunjukkan ketika efisiensi pada kecepatan tinggi.

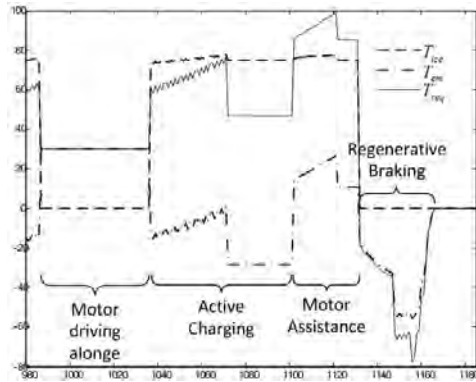


(a) FTCS



(b) LTCS

Gambar 2.5 Respon Perbandingan FTCS dan LTCS



(a) Hasil Distribusi Torsi dengan FTCS

	FTCS	LTCS
$\eta_{ice}$	0.244	0.197
$\eta_{em}$	0.875	0.866
$\eta_{bat}$	0.907	0.889
$\eta_{tran}$	0.796	0.776
$F_{revised} (L/100km)$	5.86	6.47

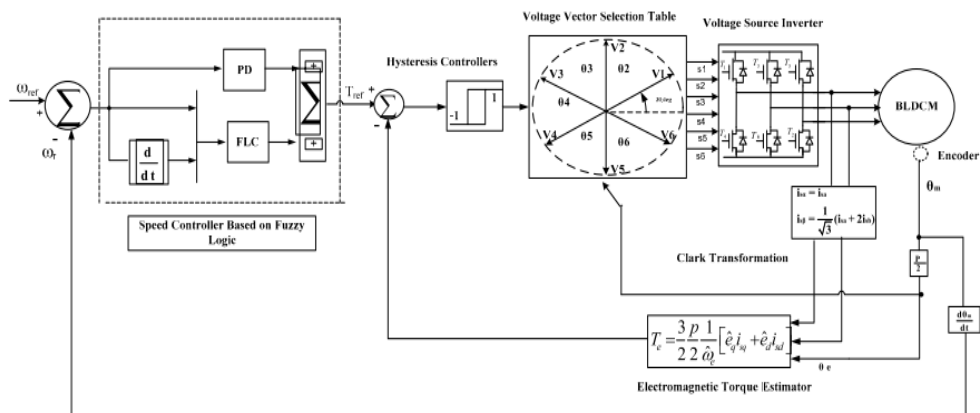
(b) Efisiensi Konsumsi Bahan Bakar

Gambar 2.6 Hasil Simulasi Strategi Pengaturan Torsi PHEV

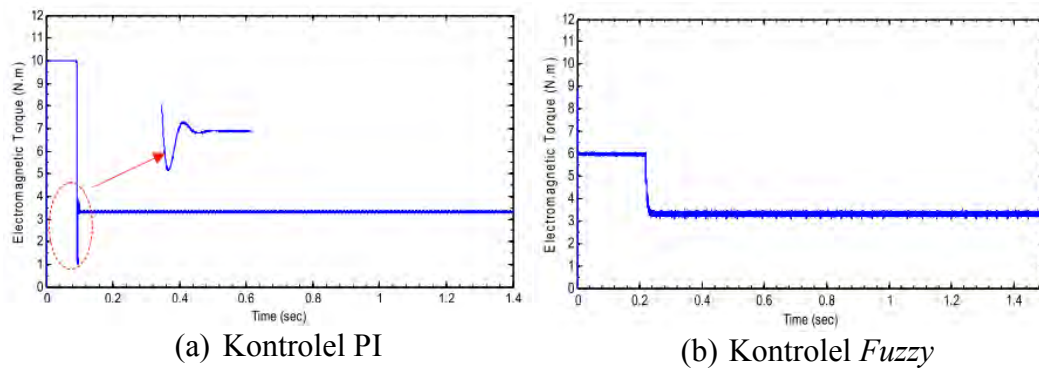
Analisa hubungan antara konsumsi bahan bakar dan SOC dari baterai, kita dapat menentukan konsumsi bahan bakar dengan asumsi SOC konstan, Secara keseluruhan diperoleh peningkatan efisiensi dengan FTCS dibandingkan dengan LTCS sebesar 9.4%

### 2.1.3 Performance Analysis of Direct Torque Controlled BLDC motor using Fuzzy Logic [6]

Penelitian ini mengangkat permasalahan pada pengaturan kecepatan motor BLDC menggunakan *direct torque control* (DTC). Masalah yang diangkat riak torsi dan terjadi *overshoot* pada saat awal *start* menggunakan kontroler PI. Solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan menggunakan *fuzzy* kontrol yang paralel terhadap kontroler PD dan metode DTC untuk mereduksi riak pada torsi.



Gambar 2.7 Rancangan Konseptual DTC BLDCM



Gambar 2.8 Respon Perbandingan Kontroler *Fuzzy* dan PI pada BLDCM

Kontroler *fuzzy* hanya digunakan untuk pengaturan kecepatan motor BLDC. Simulasi dilakukan dengan torsi yang konstan. Penelitian ini berhasil reduksi *overshoot* pada saat *start*, namun menimbulkan riak torsi yang lebih besar amplitudonya.

#### 2.1.4 Perancangan Konstruksi *Self Commutation Multistage Axial Field* BLDC Motor dengan Pengaturan Menggunakan *Sliding Mode Control* (SMC) [5]

Pada penelitian ini membahas perancangan motor BLDC jenis *Multistage Axial Field*, desain *driver* yang menggunakan metode *Self Commutation*, Proses identifikasi *Multistage Axial Field BLDC Motor*, perancangan model matematika dan simulasi *plant* berdasarkan hasil identifikasi serta perancangan model matematika dan simulasi *Sliding Mode Control* (SMC). Namun pada pembahasan ini akan mengkaji desain *driver* yang menggunakan metode *Self Commutation*, Karena pada penelitian selanjutnya akan diterapkan metode *Self Commutation* untuk driver motor BLDC.

Rangkaian *logic commutation* mengubah sinyal pembacaan posisi rotor menggunakan sensor *hall effect*. sinyal komutasi dihilangkan *over lapping* sebesar  $60^\circ$ . Sinyal *output* digabungkan dengan satu sinyal PWM dan digandakan menjadi enam sinyal (*six step*) yang saling berpasangan disesuaikan dengan jumlah *mosfet* pada *power electronic*.

Pada sudut komutasi sudah tidak terjadi *over lapping*  $60^\circ$  dan telah digabung dengan PWM. Dari respon keluaran *driver* masih terdapat *error* atau sinyal yang cacat.

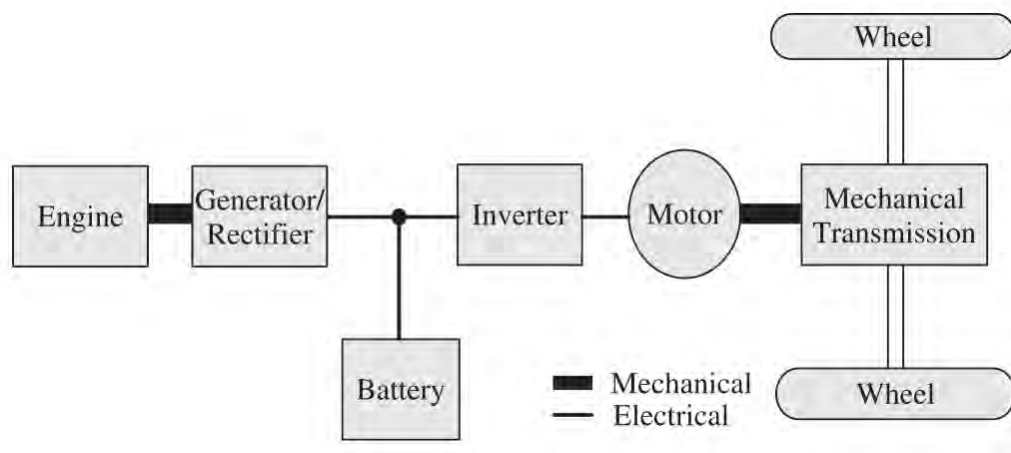
## 2.2 Teori Dasar

Untuk mendukung penelitian yang akan dilakukan, dibutuhkan beberapa dasar teori yang akan dipergunakan. Pembahasan dalam dasar teori ini meliputi *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), motor BLDC, motor DC dan komponen pendukung lainnya serta kontroler.

### 2.2.1 *Hybrid Electric Vehicle* [1]

*Hybrid Electric Vehicle* (HEV) merupakan kendaraan sumber energi penggerak dari kombinasi minimal dua sumber, seperti *internal combustion engine* (ICE) dan motor listrik. HEV dapat dikategorikan menjadi tiga tipe yaitu seri, paralel dan *power split*.

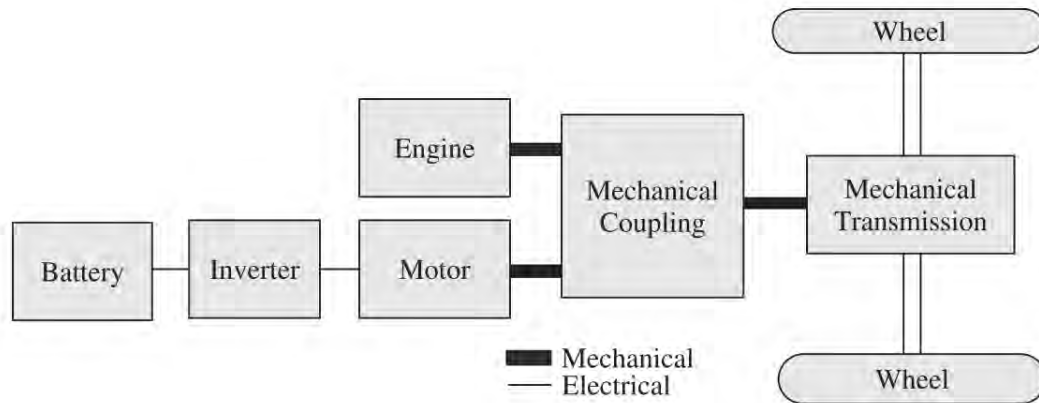
HEV tipe seri memiliki prinsip sama dengan *electrical vehicle* dimana semua torsi yang digunakan sebagai penggerak dihasilkan oleh motor listrik. Motor mendapatkan suplay tegangan dari baterai atau dari generator yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Kekurangan dari tipe ini adalah efisiensi dari motor menyebabkan performa kendaraan menjadi kurang optimal pada kondisi tertentu seperti saat respon akselerasi yang lambat. Gambar 2.9 menunjukkan konfigurasi HEV tipe seri.



Gambar 2.9 HEV Tipe Seri

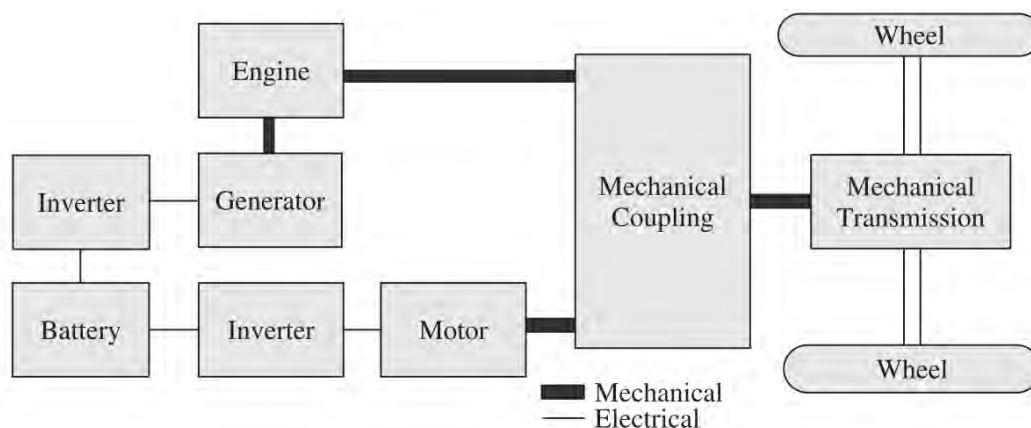
HEV tipe paralel memiliki konfigurasi sesuai Gambar 2.10, dimana masing-masing penggerak dapat bekerja secara mandiri ataupun bersama. Kelebihan HEV tipe paralel yaitu torsi total dihasilkan oleh mesin bakar secara

mekanis terhubung dengan motor listrik sehingga respon yang cepat pada mode akselerasi dapat tercapai.



Gambar 2.10 HEV Tipe Paralel

HEV tipe *power split* merupakan kombinasi dari tipe seri dan paralel (Gambar 2.11). Konfigurasi ini menggabungkan kelebihan dari HEV tipe seri dan paralel sekaligus mengeliminasi kekurangan pada masing-masing tipe. Konfigurasi ini menjadikan sistem dapat bekerja dengan kondisi motor digunakan untuk mengontrol kecepatan kendaraan dan mesin bakar ikut memberikan torsi yang diperlukan untuk meningkatkan akselerasi.



Gambar 2.11 HEV Tipe *Power Split*

Daya, kecepatan putaran, dan kecepatan linier mesin mempunyai hubungan satu dan lainnya. Mesin bekerja secara dasar dengan bergerak (putaran). Layaknya pengkonversian segala macam bentuk energi menjadi energi gerak.



Energi gerak ini yang dimanfaatkan untuk menggerakkan beban. Dalam hal ini mesin mengubah energi listrik menjadi energi gerak yang menghasilkan kecepatan linier.

Daya pada mesin kendaraan adalah tenaga yang di hasilkan mesin tersebut. Daya ini dihasilkan oleh Torsi dan Kecepatan Sudut, ditunjukkan dengan Persamaan (2.2).

$$P = T\omega \quad (2.2)$$

dengan,

$P$  : daya (Watt)

$T$  : torsi (Nm)

$\omega$  : kecepatan Sudut (rad/s)

Jika diketahui bukan Kecepatan Sudut, melainkan Kecepatan Putaran ( $N$ ), sehingga daya dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.3).

$$P = \frac{TN2\pi}{60} \quad (2.3)$$

Kecepatan linier kendraan ( $v$ ) di dapatkan dari kecepatan sudut dengan Persamaan (2.4).

$$v = \omega r_w \quad (2.4)$$

Untuk mengubah kecepatan putaran menjadi kecepatan sudut, maka dapat menggunakan Persamaan (2.5).

$$\omega = \frac{N2\pi}{60} \quad (2.5)$$

Sementara untuk menghitung torsi pada beban dapat menggunakan Persamaan (2.5)

$$T = Wb \quad (2.5)$$

dengan  $W$  adalah beban dalam (N) dan  $b$  adalah jarak beban dengan perputaran dalam (m).

Performa kendaraan merupakan hal peting dalam pengembangan kendaraan. Menurut US PNGV's (*Partnership for a New Generation of Vehicle's*) untuk kendaraan sedang atau menengah performa yang mesti dicapai adalah [1]:

- 0-60 mph:  $\leq 12$  detik
- 40-60 mph:  $\leq 5.3$  detik

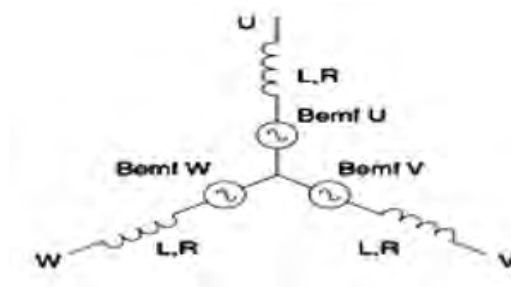
- 0-85 mph  $\leq$  23.4 detik
- Maximum speed: 85 mph

### 2.2.2 *Brushless DC Motor (BLDCM)* [7]

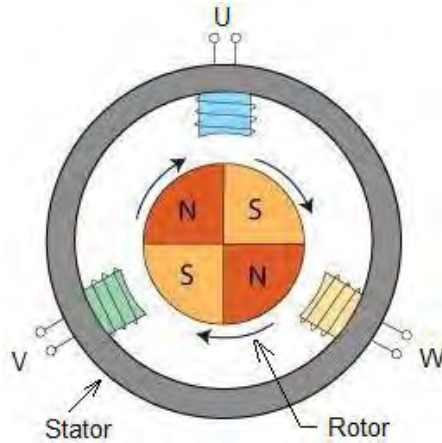
BLDCM merupakan jenis motor dari hasil pengembangan motor DC yang menggunakan sikat komutator. Dibandingkan dengan motor DC, BLDCM memiliki kelebihan yaitu efisiensi tinggi, umur yang relatif panjang, konsumsi energi lebih rendah, perawatan lebih mudah dan tidak menimbulkan *electrical noise*.

Seperti halnya motor pada umumnya, konstruksi BLDCM terdiri dari dua bagian utama yaitu *stator* dan *rotor*. Konstruksi dasar sebuah *stator* yang memiliki kumparan tiga fasa, jumlah kumparan dibuat untuk memiliki riak torsi yang lebih kecil. Pada setiap kumparan *stator* masing-masing memiliki tiga unsur yang terhubung seri Gambar 2.12, yaitu induktansi (L), resistansi (R), dan gaya gerak listrik kembali (*back e.m.f*). menunjukkan konfigurasi kumparan stator.

Pada bagian *rotor*, terdiri atas susunan magnet permanen. Jika dibandingkan dengan motor DC komutator, rotor BLDCM lebih ringan karena tidak terdapat kumparan seperti pada motor DC komutator. Gambar 2.13 menunjukkan kumparan *stator* dan *rotor* BLDCM.



Gambar 2.12 Konfigurasi Kumparan Stator



Gambar 2.13 Kumpan Stator Tiga Fasa dan Rotor BLDCM

Persamaan matematis tegangan BLDCM didapatkan dengan hukum kirchoff untuk masing-masing fasa  $V_a$ - $V_b$ - $V_c$  yang diberikan pada Persamaan (2.6).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_b & M_b & M_b \\ M_b & L_b & M_b \\ M_b & M_b & L_b \end{bmatrix}}_D \frac{\begin{bmatrix} di_a \\ di_b \\ di_c \end{bmatrix}}{dt} = \underbrace{\begin{bmatrix} -R_b & 0 & 0 \\ 0 & -R_b & 0 \\ 0 & 0 & -R_b \end{bmatrix}}_{-RI} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + I \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - I \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Dari Persamaan (2.6) maka dapat diperoleh persamaan arus stator yang ditunjukkan pada Persamaan (2.7).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = D^{-1} \left\{ RI \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + I \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - I \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right\} \quad (2.7)$$

dengan,

$V_a, V_b, V_c$  : tegangan kumparan stator setiap fasa

$i_a, i_b, i_c$  : arus kumparan stator setiap fasa

$e_a, e_b, e_c$  : back EMF Setiap fasa

$R_b$  : resistansi BLDCM

$L_b$  : induktansi BLDCM

$M_b$  : mutual induktansi ketiga kumparan

Torsi BLDCM yang dihasilkan oleh ketiga fasa diberikan pada Persamaan (2.8).

$$T_b = \left( \frac{1}{\omega_b} \right) (e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c) \quad (2.8)$$

Putaran yang dihasilkan oleh BLDCM diberikan pada Persamaan (2.9).

$$T_b - T_L - B_b = J_b \left( \frac{d\omega_b}{dt} \right) \quad (2.9)$$

dengan,

$T_b$  : torsi motor

$T_L$  : torsi beban

$B_b$  : koefisien damping

$\omega_b$  : kecepatan angular motor

$J_b$  : momen inersia motor

### 2.2.3 Motor DC [8]

Motor DC terdiri dari dua bagian utama yaitu *stator* (bagian yang diam) dan *rotor* (bagian yang berputar). Pada bagian *stator* merupakan tempat kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan fluk magnet sedangkan pada bagian *rotor* terdapat rangkaian jangkar seperti kumparan jangkar (*armature*) yang menghasilkan gaya putar, komutator dan sikat. Kumparan jangkar pada dasarnya adalah kawat yang dialiri arus, sehingga menimbulkan gaya Lorentz. Disebut kumparan, karena jumlah kawatnya yang banyak. Dengan demikian semakin banyak kawat, maka gaya Lorentz yang dihasilkan akan semakin besar dan kontinyu. Torsi yang terbentuk mengikuti Persamaan (2.10).

$$T = K \times I_a \times \emptyset \quad (2.10)$$

dengan,

$T$  : torsi yang dibangkitkan (Nm)

$K$  : konstanta mesin

$I_a$  : arus jangkar (A)

$\emptyset$  : fluks magnet (Weber)

Sementara gaya gerak listrik induksi diberikan pada Persamaan (2.11).

$$E_a = c \times n \times \Phi \quad (2.11)$$

dengan,

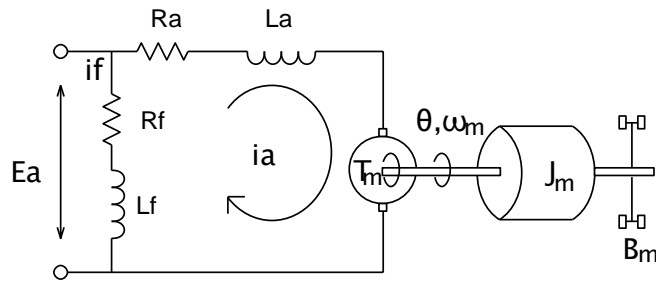
$E_a$  : gaya gerak listrik induksi (V)

$n$  : kecepatan putaran (rpm)

$\Phi$  : fluks setiap kutup (Weber)

$c$  : konstanta

Motor DC berdasarkan konstruksinya dapat dibedakan menjadi *brushed*, *brushless*, dan permanen magnet. Motor DC *brushed* terdiri dari beberapa macam konfigurasi, yaitu *shunt*, seri, dan *compound*. Ketiganya memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Motor DC dengan konfigurasi paralel memiliki karakteristik non linier terhadap arus jangkar, arus medan dan torsi motor. Konfigurasi motor DC paralel secara fisik dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Konfigurasi Fisik Motor DC Paralel

Dari konfigurasi tersebut dapat dicari pemodelan fisik motor DC paralel seperti berikut ini,

a. Rangkaian Arus Medan

$$I_f = \frac{1}{L_f s + R_f} E_a \quad (2.12)$$

$$\dot{I}_f = -\frac{R_f I_f}{L_f} + \frac{E_a}{L_f} \quad (2.13)$$

b. Rangkaian Arus Jangkar

$$I_a = \frac{1}{L_a s + R_a} (E_a - E_{ggl}) \quad (2.14)$$

$$\dot{I}_a = -\frac{R_a I_a}{L_a} + \frac{E_a}{L_a} - \frac{E_{ggl}}{L_a} \quad (2.15)$$

dimana  $E_{ggl} = K_{ggl} \times I_f \times \omega_m$ , sehingga:

$$\dot{I}_a = -\frac{R_a I_a}{L_a} + \frac{E_a}{L_a} - \frac{E_{ggl}}{L_a} (K_{ggl} \times I_f \times \omega_m) \quad (2.16)$$

c. Rangkaian Torsi Motor

$$\omega_m = \frac{(T_m s - T_l)}{J_m s + B_m} \quad (2.17)$$

$$\dot{\omega}_m = \frac{K_{Tm} I_a I_f}{J_m} - \frac{B_m \omega_m}{J_m} - \frac{B_l \omega_m}{J_m} \quad (2.18)$$

Persamaan (2.13) merupakan persamaan non linier motor DC terhadap arus medan. Persamaan (2.16) merupakan persamaan non linier motor DC terhadap arus jangkar dan Persamaan (2.18) merupakan persamaan non linier motor DC terhadap torsi motor.

#### 2.2.4 *Timing Belt* dan Perbandingan *Gear* [9]

*Belt* sering kali digunakan untuk menghubungkan dua buah roda gigi untuk merubah kecepatan ataupun kecepatan sudut yang bertujuan untuk memperbesar maupun memperkecil nilainya dengan mengatur ukuran roda gigi yang digunakan. Salah satu jenis *belt* yang sering digunakan aplikasi perpindahan gerak adalah *timing belt*. Konstruksi *timing belt* dapat dilihat pada Gambar 2.15. *Timing belt* memiliki gerigi – gerigi yang seragam, sehingga lebih efektif dari *V-belt* yang rawan terhadap selip.

*Gear* merupakan suatu lingkaran yang memiliki gerigi di bagian luarnya. *Gear* ini digunakan untuk mengubah kecepatan sudut atau torsi. Terdapat dua konfigurasi *gear* yaitu pada satu poros dan beda poros. *Gear* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu beda poros. *Gear* beda poros disebut juga dengan *gear* reduksi. Pada konfigurasi *gear* beda poros, *gear* menghubungkan dua poros yang berbeda dengan menggunakan *belt*, *chain*, ataupun rantai. Konfigurasi dasar untuk dua *gear* yang berbeda poros dapat dilihat pada Persamaan (2.19).

$$V_A = V_B \quad (2.19)$$

$$\omega_A R_A = \omega_B R_B \quad (2.20)$$

$$\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{R_B}{R_A} \quad (2.21)$$

Dimisalkan  $R_A = 2R_B$  maka,

$$\omega_A = \frac{1}{2} \omega_B \quad (2.22)$$

Torsi pada *gear* dapat dihitung melalui Persamaan (2.23)

$$T_g = F_g \times R_g \quad (2.23)$$

dengan,

$T_g$  : torsi (Nm)

$F_g$  : gaya yang bekerja pada *gear* (N)

$R_g$  : jari-jari *gear* (m)

Dari Persamaan (2.23), maka didapatkan aturan gaya yang bekerja pada *gear* seperti pada Persamaan (2.24) dan Konfigurasi gear beda poros ditunjukkan pada Gambar 2.15.

$$F_A = F_B \quad (2.24)$$

$$\frac{T_A}{R_A} = \frac{T_B}{R_B}$$

$$\frac{T_A}{2R_B} = \frac{T_B}{R_B}$$

Sehingga didapatkan perbandingan torsi,

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{2R_B}{R_B} \quad (2.25)$$

$$T_A = 2T_B \quad (2.26)$$

dengan,

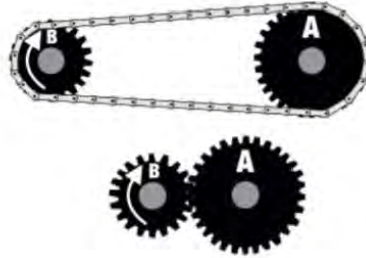
$V_A, V_B$  : Kecepatan linier pada *gear* A dan B (m/s)

$\omega_A, \omega_B$  : kecepatan sudut pada *gear* A dan B (rad/s)

$R_A, R_B$  : jari-jari pada *gear* A dan B (m)

$F_A, F_B$  : gaya yang bekerja pada *gear* A dan B (N)

$T_A, T_B$  : torsi pada *gear* A dan B (Nm)



Gambar 2.15 Konfigurasi *Timing Belt* dan *Gear*

### 2.2.5 Rem Elektromagnetik [9]

Ketika fluks magnet melalui konduktor, arus eddy dibangkitkan pada konduktor tersebut. Arus eddy bersirkulasi dalam konduktor menghasilkan medan magnet yang memiliki polaritas yang berlawanan. Interaksi dari dua medan magnet menyebabkan gaya yang menghambat perubahan fluks magnet. Namun karena hambatan dalam dari material konduktif, arus eddy akan didisipasikan menjadi panas dan gaya akan berkurang. Selama arus eddy didisipasi, energi dipindahkan dari sistem dan mengakibatkan efek peredaman.

Salah satu sifat yang berguna pada peredaman arus eddy adalah memindahkan energi sistem tanpa bersentuhan langsung dengan struktur. Rem ini terdiri dari beban magnetik dengan kumparan listrik yang diletakkan sepanjang lintasan beban magnetik ini menjadi magnet alternatif kutub utara dan selatan. Magnet ini tidak menyentuh lintasan, tetapi berjarak cukup kecil dari lintasan. Ketika magnet digerakkan melalui lintasan, akan menghasilkan medan magnet non stasioner pada ujung lintasan yang menghasilkan tagangan listrik (hukum induksi faraday) dan menyebabkan arus *eddy*. Dengan gangguan dari medan magnet, medan magnet memberikan gaya yang berlawanan sehingga menciptakan gaya horizontal yang melawan gerak magnet.

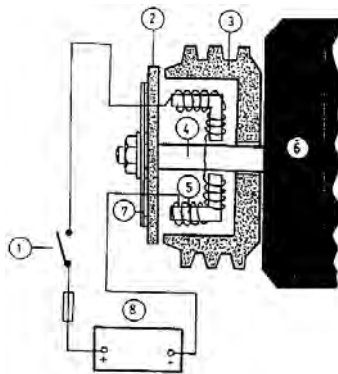
Rem elektromagnet biasa diletakkan dekat dengan bagian yang bergerak. Rem ini bekerja pada kondisi yang dingin dan memenuhi persyaratan energi pengereman kecepatan tinggi karena tanpa adanya gesekan.



### 2.2.6 Kopling Elektromagnetik

Kopling Elektromagnetik berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan daya dari penggerak ke transmisi. Komponen-komponen utama dari kopling elektromagnetik antara lain : stator, *pulley*, rotor dan piringan penekan. Konstruksi kopling elektromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.16.

Cara kerja kopling elektromagnetik yaitu bila saklar (1) diaktifkan, maka arus yang berasal dari baterai mengalir ke kumparan, sehingga pada kumparan tersebut timbul medan magnet, sehingga akan menarik piringan penekan (2), sehingga berhubungan dengan roda *pulley* (3). Akibatnya piringan penekan ikut berputar dengan *pulley*, demikian juga poros akan ikut berputar bersamaan dengan *pulley*. *Pulley* poros berputar bersamaan dengan putaran mesin, putaran ini disalurkan ke beban oleh *v-belt*.



Gambar 2.16 Konstruksi Kopling Elektromagnetik

### 2.2.7 Metode Identifikasi Sistem [10]

Identifikasi sistem merupakan proses untuk memperoleh parameter-parameter dari suatu sistem berdasarkan hasil pengukuran input dan output *plant*. Berdasarkan hasil pengukuran tersebut maka akan diperoleh model matematis suatu *plant*. Pada tesis ini identifikasi motor bakar dilakukan dengan menggunakan metode identifikasi *strejc*.

Metode *strejc* adalah salah satu metode identifikasi yang dilakukan dengan cara menarik garis singgung pada respon *plant*. Dari penarikan garis maka didapatkan  $t_u$  dan  $t_n$ , dimana  $t_u$  merupakan titik awal belok dan  $t_n$  merupakan titik akhir belok. Metode identifikasi *strejc* dilakukan dengan beberapa tahap yaitu:

- a. Mendapatkan parameter  $\tau$  dari perbandingan  $t_u$  dan  $t_n$ , diperoleh persamaan:

$$\tau = \frac{T_u}{T_n} \quad (2.27)$$

- b. Berdasarkan nilai  $\tau$  maka dapat ditentukan orde pada *plant* menggunakan Tabel 2.2. dengan  $n$  merupakan orde dari sistem dan  $y_i$  merupakan nilai respon ketika mencapai titik  $y_i$ .

Tabel 2.2 Pendekatan Orde ke-n dan Nilai  $y_i$

$\tau$	(n)	$y_i$	$\tau$	(n)	$y_i$	$\tau$	(n)	$y_i$
0.104	2	0.264	0.410	5	0.371	0.642	8	0.401
0.218	3	0.327	0.493	6	0.384	0.709	9	0.407
0.319	4	0.359	0.570	7	0.394	0.773	10	0.413

- c. Berdasarkan nilai  $y_i$  pada tabel, kemudian dilakukan pengamatan pada respon untuk waktu mencapai pada titik  $y_i$  dan diperoleh nilai waktu ke  $t_i$ .
- d. Dapatkan konstanta waktu  $\tau_{pm}$  dengan Persamaan (2.28).

$$\tau_{pm} = \frac{t_i}{n-1} \quad (2.28)$$

- e. Model sistem dapat diperoleh dari Persamaan (2.29).

$$G(s) = \frac{K}{(\tau_{pm}s + 1)^n} \quad (2.29)$$

### 2.2.8 Root Mean Square Error (RMSE) [9]

RMSE merupakan suatu metode yang digunakan untuk merepresentasikan ukuran nilai dari *error* rata-rata. RMSE juga dapat mengukur akurasi pada nilai deret waktu secara statistik seperti halnya regresi. Pada proses perhitungannya metode RMSE membandingkan hasil data pengukuran dan data pemodelan pada skala yang sama antara kedua data tersebut. RMSE dan nilai *error* masing-masing dapat dihitung dengan menggunakan Persaman (2.30) dan (2.31).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.30)$$

$$e_i = \frac{A_i - M_i}{A_i} \times 100\%, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.31)$$

dengan,

$n$  : jumlah data

$i$  : urutan data

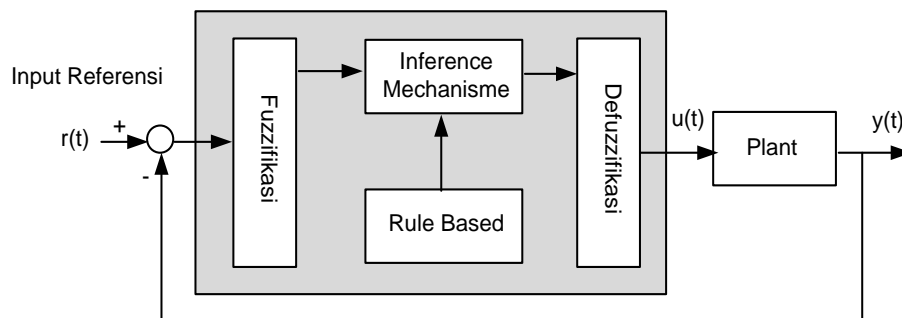
$e$  : nilai *error*

$A$  : nilai data hasil pengukuran

$M$  : nilai data hasil pemodelan

### 2.2.9 Kontroler Fuzzy [11, 12]

Kontroler logika *fuzzy* merupakan suatu kontroler yang proses perhitungan sinyal kontrolnya melalui operasi himpunan *fuzzy* meliputi proses *fuzzifikasi*, relasi *fuzzy*, inferensi *fuzzy* serta *defuzzifikasi* seperti terlihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Skema Dasar Kontroler Fuzzy

Proses didalam himpunan *fuzzy* antara lain sebagai berikut:

#### 2.2.9.1 Fuzzifikasi

*Fuzzyfikasi* berfungsi untuk mengubah sinyal masukan yang bersifat biner (*crisp*) kedalam konsep *fuzzy*. Konsep *fuzzy* tidak bekerja secara biner, tetapi berupa himpunan *fuzzy* dimana elemen – elemennya dinyatakan dengan pasangan elemen anggota himpunan  $x$  dengan fungsi keanggotaan.

#### 2.2.9.2 Rule Based

Basis aturan merupakan deskripsi linguistik terhadap variabel *input* dan *output*. Penentuan basis aturan yang dipakai mengontrol suatu *plant* dapat melalui

metode heuristik maupun deterministik. Metode heuristik didasarkan pada pengetahuan terhadap *plant* dan perilaku dari *plant* yang akan dikontrol. Sedangkan metode deterministik diperoleh melalui identifikasi struktur dan parameter dari aturan kontrol. Pemetaan *input* dan *output* pada sistem *fuzzy* direpresentasikan dalam Persamaan (2.32).

$$\text{If premis Then konsekuen} \quad (2.32)$$

Pada kontroler *fuzzy*, *input* kontroler direpresentasikan dalam premis dan *output* kontroler direpresentasikan dalam konsekuen. Jumlah basis aturan dari suatu sistem *fuzzy* ditentukan dari jumlah variabel pada *input* dan jumlah *membership function* pada variabel masukan, dirumuskan dalam Persamaan (2.33).

$$\prod_{t=1}^n N_t = N_1 \times N_2 \times \dots \times N_n \quad (2.33)$$

Dimana  $N_i$  merupakan jumlah *membership function* pada variabel input  $i$ . Sebagai contoh apabila variabel *input* pertama memiliki tiga *membership function* dan variabel *input* kedua memiliki tiga *membership function*, maka jumlah basis aturan adalah  $3 \times 3 = 9$  aturan.

#### 2.2.9.3 Logika Pengambilan Kesimpulan (*Inference Mechanism*),

Mekanisme inferensi pada kontroler *fuzzy* berisi operasi logika *fuzzy* untuk memperoleh aksi kontrol dari masukan yang diterima. Pada basis aturan terdapat dua operasi matematika yang dapat dilakukan yaitu AND dan OR.

Terdapat beberapa tipe mekanisme inferensi *fuzzy* antara lain Mamdani, Larsent dan Takagi Sugeno. Perbedaan dari metode ini terletak pada pengambilan kesimpulan logika *fuzzy*. Pada metode Mamdani maupun Larsent, kesimpulan logika *fuzzy* berupa derajat keanggotaan sehingga dalam menyimpulkan suatu logika *fuzzy* dibutuhkan proses *defuzzifikasi*. Sedangkan pada tipe Takagi Sugeno, kesimpulan logika *fuzzy* berupa suatu persamaan sehingga tidak diperlukan proses *defuzzifikasi*. Kelebihan pada logika *fuzzy* tipe Mamdani dan Larsent lebih sederhana, akan tetapi diperlukan kemampuan untuk mengetahui karakteristik *plant* untuk menentukan batasan keluaran kontroler.

#### 2.2.9.4 Defuzzifikasi

*Defuzzifikasi* adalah suatu proses mentransfortasikan harga *fuzzy* hasil dari inferensi *fuzzy* de dalam harga bukan *fuzzy* atau harga aktual. Beberapa metode dalam proses *defuzzifikasi* yaitu *Center of Area*, *Mean of Maxima* dan lain sebagainya

a. *Center of Area*

Metode *Center of Area* digunakan untuk menentukan nilai titik tengah area yang merupakan titik pusat massa dari kombinasi fungsi-fungsi keanggotaan. Secara umum, persamaan untuk metode *Center of Area* ditunjukkan dengan Persamaan (2.34).

$$v_o = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_k(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)} \quad (2.34)$$

dengan,

$v_o$  = nilai keluran

$m$  = tingkat kuantisasi

$v_k$  = elemen ke- $k$

$\mu_k(v_k)$  = derajat keanggotaan elemen-elemen pada *fuzzy set*  $v$

$v$  = semesta pembicaraan

b. *Mean of Maxima*

Metode *Mean of Maxima* mengambil semua nilai tiap fungsi keanggotaan dengan derajat keanggotaan maksimum dan menghitung rata-rata dari nilai-nilai tersebut sebagai keluaran tegas. Persamaan (2.35) dan Persamaan (2.36) menunjukkan persamaan umum metode tersebut.

$$v_o = \sum_{j=1}^J \frac{v_j}{J} \quad (2.35)$$

$$v_i = v \mu_v(v) \quad (2.36)$$

dengan,

$v_o$  = nilai keluran

$J$  = jumlah harga maksimum

$v_j$  = nilai keluaran maksimum ke- $j$

$\mu_v(v)$  = derajat keanggotaan elemen-elemen pada *fuzzy set*  $v$

$v$  = semesta pembicaraan

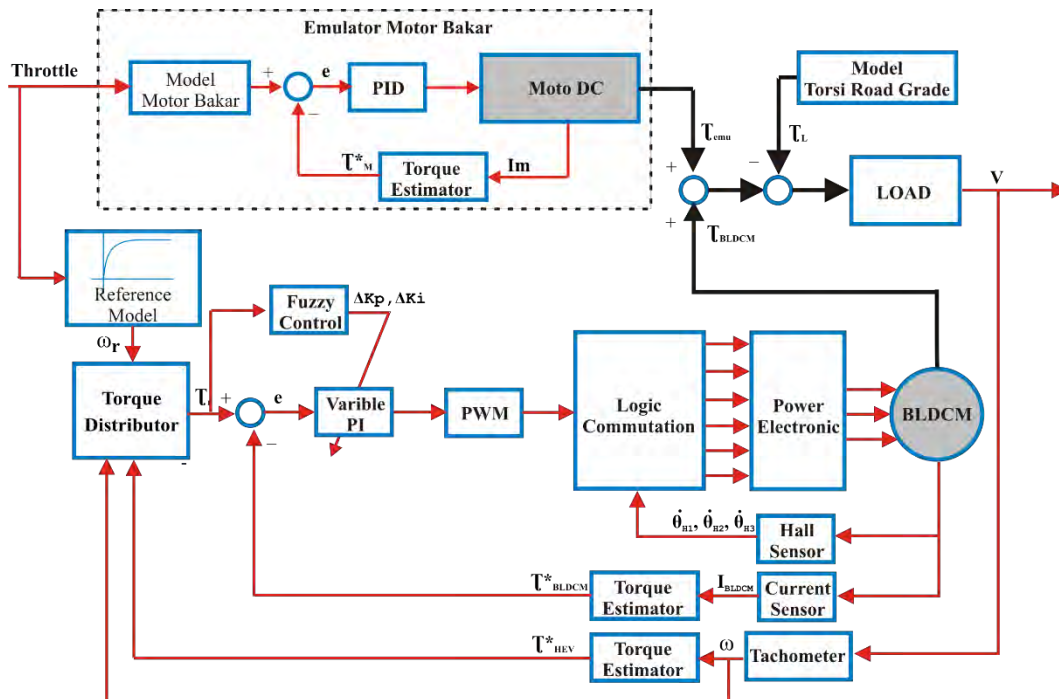
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

### BAB 3

### PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini membahas mengenai tahapan dalam proses perancangan sistem secara keseluruhan. Adapun tahapan tersebut meliputi perancangan simulator HEV, identifikasi parameter pada penggerak simulator HEV dan perancangan dan pemodelan beban serta perancangan dan pemodelan kontroler.

Tipe HEV yang diterapkan dalam penelitian ini merupakan tipe paralel. HEV ini dibuat dalam bentuk simulator, dimana penggerak utama (*prime mover*) digantikan dengan motor DC (emulator motor bakar) dan penggerak sekunder menggunakan BLDCM. Kedua sumber penggerak tersebut terhubung pada satu *shaft* (poros) roda. Sumber utama torsi dihasilkan dari emulator, sementara BLDCM memberikan torsi bantu. Adapun perancangan konseptual sistem secara keseluruhan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Motor DC digunakan pada penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan pengukuran torsi motor bakar. Hal ini karena pengukuran dan pengaturan torsi motor bakar yang tergolong sulit.



Gambar 3.1 Diagram blok perancangan konseptual sistem

*Throttle* berfungsi memberikan *set point* kecepatan HEV. *Referace model* merupakan model acuan HEV dengan respon kecepatan yang lebih cepat dari respon emulator motor bakar. Torsi distributor merupakan blok yang berfungsi menghitung kekurangan torsi yang dibutuhkan HEV. Nilai kekurangan torsi tersebut menjadi referensi BLDCM. Pada BLDCM dilakukan pengaturan torsi menggunakan kontroler PI, dimana parameter Kp dan Ki selalu di-*update* menggunakan kontroler *fuzzy*, *input* kontroler *fuzzy* merupakan perubahan nilai referensi.

### 3.1 Perancangan Simulator HEV

Pada tahapan ini membahas perancangan *hardware* simulator HEV, dimulai dengan perancangan konstruksi mekanik dan analisa, penjelasan komponen yang digunakan dan perancangan *driver* BLDCM. Spesifikasi simulator HEV yang dirancang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi Simulator HEV

No	Parameter	Nilai
1	Kecepatan Kendaraan ( $v$ )	60 km/jam
2	Diameter Roda	12 inch
	Jari-jari roda ( $r_w$ )	0.1524 m

#### 3.1.1 Perancangan Konstruksi Mekanik

Tujuan perancangan konstruksi mekanik yaitu agar proses pembuatan simulator HEV lebih terarah. Pada HEV tipe paralel kedua torsi digabung dalam satu poros roda. Desain simulator HEV dan perangkat pendukungnya dapat dilihat pada Gambar 3.2. Perancangan mekanik secara keseluruhan diberikan pada Lampiran 1.

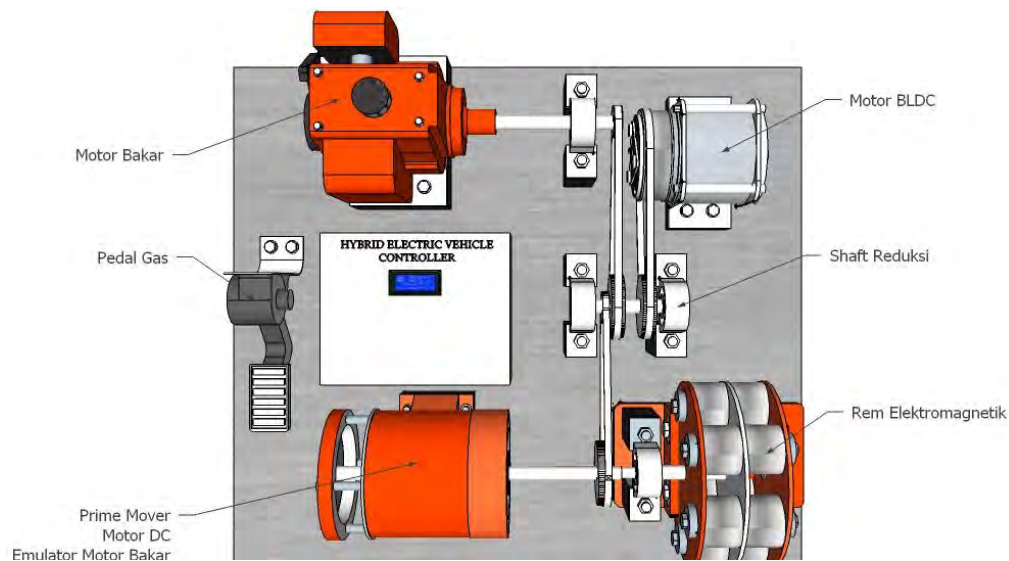
Pemilihan *prime mover* ditentukan berdasarkan kecepatan linier kendaraan ( $v$ ) dan jari-jari roda kendaraan ( $r_w$ ). Kecepatan putaran *prime mover* ( $N$ ) diperoleh dengan menggunakan Persamaan (2.4).

$$v = \omega r_w$$

dimana  $\omega$  diperoleh dari Persamaan (2.5),

$$\omega = \frac{2 \pi N}{60}$$





Gambar 3.2 Perancangan Konstruksi Mekanik Simulator HEV

dengan memasukkan Persamaan (2.5) ke Persamaan (2.4) sehingga menjadi Persamaan (3.1).

$$v = \frac{2 \pi N}{60} r_w \quad (3.1)$$

dari Persamaan (3.1) di ubah menjadi Persamaan (3.2).

$$N = \frac{60v}{2 \pi r_w} \quad (3.2)$$

dimana  $v = 16.67$  (m/s) dan  $r_w = 0.1524$  m, kemudian dimasukkan ke Persamaan (3.2), sehingga kecepatan *prime mover* yang dibutuhkan adalah:

$$N = \frac{60 \times 16.67}{2 \pi \times 0.1524} = 1045 \text{ rpm}$$

Torsi ( $T$ ) yang dihasilkan *prime mover* dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.2).

$$P = T \omega$$

dengan memindah ruas Persamaan (2.2), maka diperoleh Persamaan (3.3).

$$T = \frac{60P}{2 \pi N} \quad (3.3)$$

Berdasarkan nilai ( $N$ ) = 1045 rpm dari Persamaan (3.2) dan nilai ( $P$ ) = 372.5 watt dari spesifikasi *prime mover* yang digunakan, maka torsi yang dihasilkan adalah:

$$T = \frac{372.5 \times 60}{2\pi \times 1045} = \frac{22350}{6562.6} = 3.405 \text{ Nm}$$

### 3.1.2 Komponen Pendukung

Komponen pendukung merupakan komponen inti penyusun simulator HEV. Komponen-komponen ini terdiri dari *prime mover*, BLDCM, rem elektronik dan kopling elektromagnetik. Berikut ini merupakan penjelasan dari komponen tersebut:

#### 3.1.2.1 Prime Mover

*Prime mover* pada simulator HEV yang dirancang menggunakan motor DC. Motor DC merepresentasikan ICE pada kendaraan *real*. *Prime mover* berperan sebagai penggerak utama untuk menanggung beban. Bentuk fisik dari motor DC yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.3. Spesifikasi *prime mover* yang digunakan dalam penelitian ini diuraikan dalam Tabel 3.2.



Gambar 3.3 Bentuk Fisik Motor DC

Tabel 3.2 Spesifikasi Motor DC

No	Parameter	Nilai
1	Tegangan	190 volt
2	Kecepatan ( <i>no load</i> )	1750 rpm
3	Daya keluaran	0.5 Hp
4	Tipe	Seri/Paralel

#### 3.1.2.2 BLDCM

Pada simulator HEV, BLDCM berfungsi sebagai penggerak sekunder. Pada penelitian ini, BLDCM diatur agar dapat membantu kerja dari *prime mover*. Bentuk fisik dari BLDCM yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.4, sementara untuk spesifikasi dilihat pada Tabel 3.3.



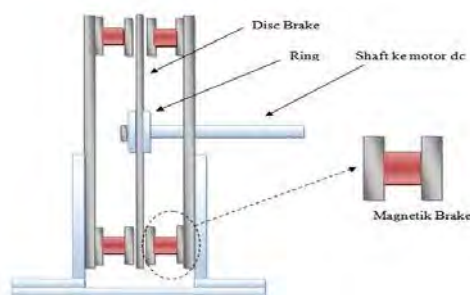
Gambar 3.4 Bentuk Fisik BLDCM

Tabel 3.3 Spesifikasi BLDCM

No	Parameter	Nilai
1	Tegangan	48 volt
2	Jumlah kutup	4
3	Daya	350 watt
4	Arus maksimum	<9.4 A
5	Kecepatan ( <i>no load</i> )	3100 rpm
6	Torsi	1.19 N.m

### 3.1.2.3 Rem Elektromagnetik

Rem elektromagnetik pada simulator HEV ini berfungsi sebagai beban. Rem elektromagnetik ini terdiri dari dua piringan besi yang diapit oleh dua penghasil medan magnet yang terdiri dari beberapa magnetik *brake* di sisi kiri dan kanan piringan. Magnetik *brake* tersebut terbuat dari konduktor yang telah dililit kumparan, karena telah dialiri arus listrik, maka akan timbul medan magnet. Konfigurasi dari rem elektromagnetik dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Konfigurasi Rem Elektromagnetik

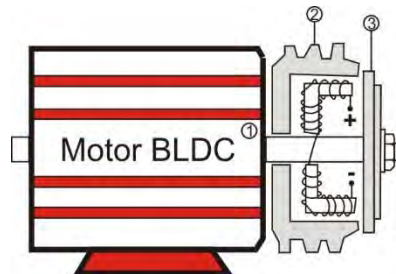
Prinsip kerja dari rem elektromagnetik ini adalah ketika kecepatan poros utama tinggi, medan magnet yang dihasilkan oleh magnetik *brake* akan menimbulkan arus *eddy*, sehingga menyebabkan gaya lawan yang berlawanan

dengan arah putar dari piringan besi. Hal ini akan menyebabkan terjadinya penurunan kecepatan putar pada *prime mover*. gaya lawan inilah yang disebut sebagai beban bagi simulator HEV.

#### 3.1.2.4 *Clutch (Kompling Elektromagnetik)*

Kopling elektromagnetik pada sistem transmisi simulator HEV berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan aliran daya ke poros utama. Komponen-komponen utama dari kopling elektromagnetik terdiri stator, *pulley*, rotor dan piringan penekan. Adapun letak kopling elektromagnetik dijelaskan pada Gambar 3.6.

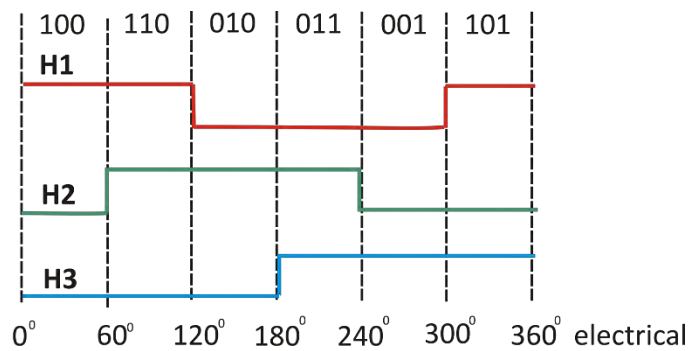
Prinsip kerja dari kompling elektromagnetik ini adalah ketika kumparan dialiri arus listrik, maka akan timbul medan magnet pada kumparan, sehingga akan menarik piringan penekan (3) dan roda *pulley* (2) kemudian akan terhubung dengan poros motor BLDC (1). Akibatnya piringan penekan ikut berputar dengan *pulley*, kemudian putaran ini disalurkan ke poros utama oleh *v-belt*.



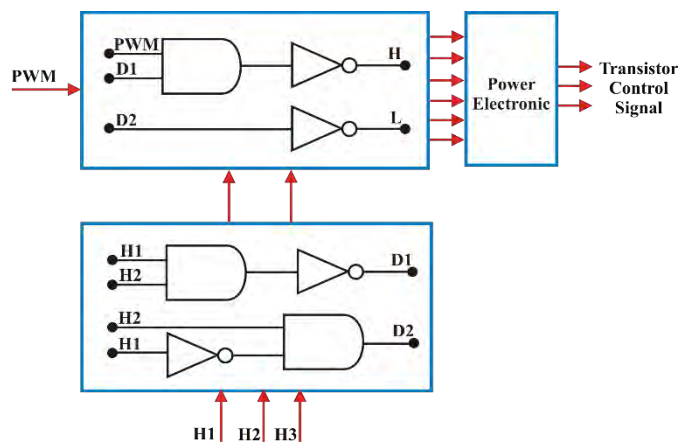
Gambar 3.6 Kopling Elektromagnetik

#### 3.1.3 Perancangan *Driver Motor*

BLDCM adalah merupakan jenis motor sinkron, sehingga dalam pengoperasiannya kecepatan putaran *rotor* dan kecepatan medan putar pada *stator* harus dijaga sinkron. Untuk menjaga agar tetap sinkron, pada tahapan ini membahas perancangan *driver* yang menggunakan metode *self commutation*. Sehingga, BLDCM dapat beroperasi seperti motor DC. hanya mengatur satu *input* sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) tanpa harus mengatur sinkronisasi antara *rotor* dan *stator*. Adapun rancangan elektronik secara keseluruhan dijelaskan dalam Lampiran 2.



Gambar 3.7 Sinyal Pembacaan Posisi Rotor Menggunakan Sensor *Hall Effect*



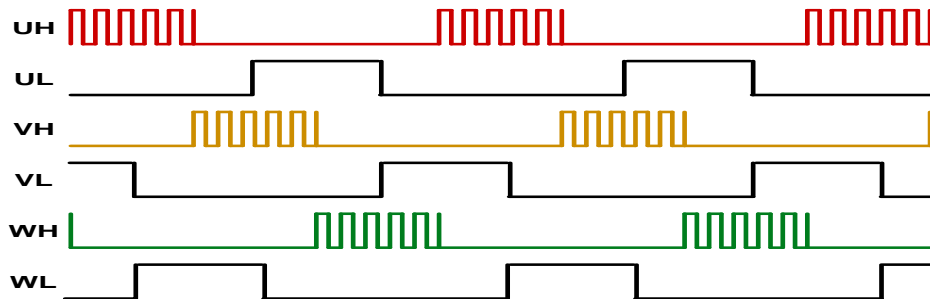
Gambar 3.8 Skema blok rangkaian *logic commutation*

Pada Gambar 3.7, terlihat bentuk sinyal pembacaan posisi rotor yang menggunakan sensor *hall effect* dengan beda sudut komutasi sebesar  $120^\circ$  dan *over lapping* sebesar  $60^\circ$ . Sinyal pembacaan tersebut akan menjadi *input* dari rangkaian *logic commutation*, seperti pada Gambar 3.8.

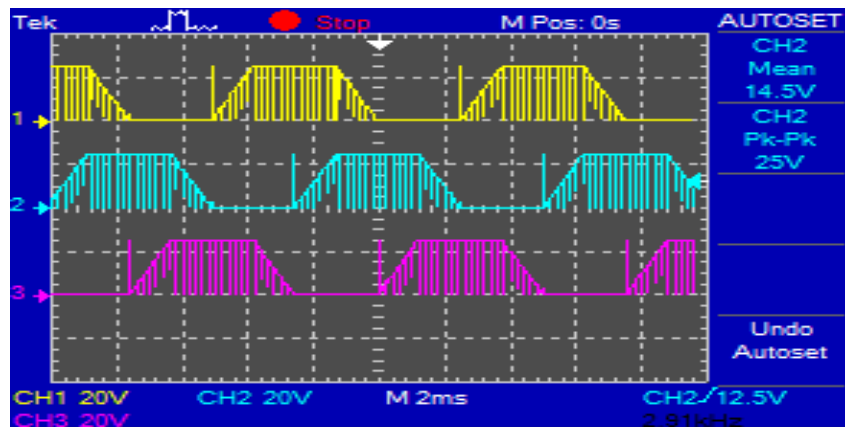
Rangkaian *logic commutation* berfungsi untuk mengubah sinyal pembacaan posisi rotor yang berasal dari sensor *hall effect*, menjadi sinyal komutasi dengan menghilangkan *over lapping* sebesar  $60^\circ$ . Setelah itu, sinyal *output* digabungkan dengan satu sumber sinyal PWM dan digandakan menjadi enam sinyal (*six step*) yang saling berpasangan disesuaikan dengan jumlah *mosfet* pada *power electronic*.

Pada penelitian ini digunakan *power electronic* jenis *half bridge* dengan enam *mosfet*. Enam *mosfet* tersebut mendapat picuan *gate* yang bersumber dari rangkaian *driver* pemacu *mosfet*. Tegangan sumber yang digunakan yaitu 48 VDC,

sesuai dengan tegangan kerja dari *plant*. Adapun bentuk sinyal keluaran dari *power electronic*, yaitu seperti pada Gambar 3.10.



Gambar 3.9 Enam Sinyal Output *Logic Commutation* dengan Gabungan PWM



Gambar 3.10 Sinyal Output Power Elektronik dengan Gabungan PWM

### 3.2 Identifikasi dan Pemodelan BLDCM

Identifikasi paramater BLDCM dilakukan untuk mengetahui parameter resistansi ( $R_b$ ), induktansi ( $L_b$ ), konstanta *ggl / back e.m.f* ( $K_{ggl}$ ), induktansi bersama/*mutual inductance* ( $M_b$ ), *damper* ( $B_b$ ), dan momen inersia ( $J_b$ ).

#### 3.2.1 Identifikasi Tahanan (Resistansi) BLDCM

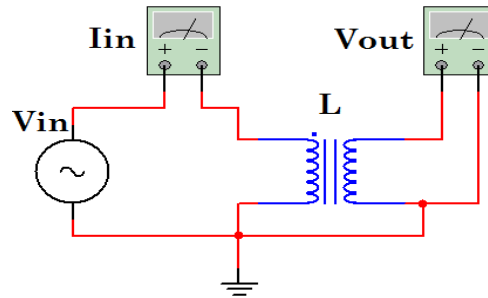
Untuk mendapatkan nilai resistansi BLDCM dilakukan pengukuran secara langsung dengan menggunakan LCR meter. Dari hasil pengukuran didapatkan nilai resistansi  $R_b = 8,4 \Omega$ .

### 3.2.2 Identifikasi Induktansi BLDCM

Untuk mendapatkan nilai induktansi BLDCM dilakukan pengukuran secara langsung dengan menggunakan LCR meter. Dari hasil pengukuran didapatkan nilai induktansi  $L_b = 4,2 \text{ mH}$ .

### 3.2.3 Identifikasi Mutual Induktansi BLDCM

Identifikasi mutual induktansi motor dilakukan untuk mengetahui nilai induktansi bersama antar kumparan stator pada BLDCM. Tahapan identifikasi dilakukan dengan memberikan tegangan AC 3 – 12 volt 50 Hz pada kumparan primer dan mengamati tegangan output di sisi kumparan sekunder seperti ditunjukkan Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Pengukuran Mutual Induktansi

Besarnya mutual induktansi dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{in} - R_b i_1 - L_b \frac{di_1}{dt} = 0$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_b} (V_{in} - R_b i_1) \quad (3.4)$$

$$V_o = M_b \frac{di_1}{dt} \quad (3.5)$$

Substitusikan Persamaan (3.4) ke Persamaan (3.5).

$$V_o = M_b \left[ \frac{1}{L_b} (V_{in} - R_b i_1) \right]$$

$$M_b = \frac{L_b V_o}{V_{in} - R_b i_1} \quad (3.6)$$

Nilai mutual induktansi didapatkan dengan menggunakan Persamaan (3.6). dari pengukuran parameter yang dibutuhkan sehingga didapatkan nilai parameter mutual induktansi (Tabel 3.4).

Tabel 3.4 Data Hasil Pengukuran Arus Input dan Tegangan Output

No	Tegangan Input (V)	Arus Input (A)	Tegangan Output (V)	Mutual Induktansi (H)
1	3	0,12	1,82	0,00383
2	6	0,18	4,12	0,00385
3	9	0,25	6,22	0,00378
4	12	0,32	8,64	0,00389
Rata-rata				0,00384

### 3.2.4 Identifikasi Konstanta Torsi BLDCM

Tahapan identifikasi konstanta torsi motor dilakukan dengan mengukur daya BLDCM pada kondisi pembebanan yang berbeda. Hubungan antara daya, torsi, kecepatan putar dan arus motor sebagai berikut :

$$P_{in} = T_b \times \omega_b \quad (3.7)$$

$$K_b = \frac{T_b}{I_b} \quad (3.8)$$

$$K_b = \frac{\Delta T_b}{\Delta I_b}$$

dengan daya  $P_{in}$  yang berubah dan kecepatan  $\omega$  yang tetap maka :

$$K_b = \frac{\frac{\Delta P_{in}}{\omega_b}}{\Delta I_b} \quad (3.9)$$

$$K_b = \frac{\Delta P_{in} \times \Delta I_b}{\omega_b}$$

$$K_b = \frac{(V_1 I_1 - V_0 I_0) \times (I_1 - I_0)}{\omega_b} \quad (3.10)$$

dengan,

$T_b$  : torsi BLDCM

$K_b$  : konstanta torsi BLDCM

$i$  : arus BLDCM



$P_{in}$  : daya BLDCM

$\omega_b$  : kecepatan BLDCM

Berikut ini tahapan identifikasi parameter konstanta torsi :

a. Pengujian tahap pertama

Pada pengujian ini BLDCM pada kondisi tanpa beban diatur pada kecepatan 1000 rpm. Dilakukan pengukuran tegangan dan arus BLDCM. Berikut ini data hasil pengukuran:

$$\omega_b = 1000 \text{ rpm} = 104.82 \text{ rad / s}$$

$$I_0 = 0.62 \text{ A}$$

$$V_0 = 48 \text{ V}$$

b. Pengujian tahap kedua

Pada pengujian ini BLDCM pada kondisi diberikan beban dengan pemberian tegangan pada rem elektrik sebesar 32 volt. Motor diatur pada kecepatan konstan 1000 rpm. Dilakukan pengukuran tegangan dan arus BLDCM. Berikut ini data hasil pengukuran:

$$\omega_b = 1000 \text{ rpm} = 104.82 \text{ rad / s}$$

$$I_0 = 1.22 \text{ A}$$

$$V_0 = 48 \text{ V}$$

Dengan memasukkan data pengukuran diatas ke Persamaan (3.10) maka didapatkan nilai konstanta torsi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} K_b &= \frac{(V_1 I_1 - V_0 I_0) \times (I_1 - I_0)}{\omega_b} \\ &= \frac{(48 \times 1.22) - (48 \times 0.62) \times (1.22 - 0.62)}{109.64} \\ &= 0.164 \end{aligned}$$

### 3.2.5 Identifikasi Konstanta *Back* EMF

Tahapan identifikasi konstanta *back* EMF dilakukan dengan memberikan gaya pada BLDCM sehingga berputar pada kecepatan tertentu dan menghasilkan tegangan balik, kemudian dilakukan pengukuran besarnya nilai tegangan balik. Hasil pengujian seperti ditunjukkan tabel 3.7.

Tabel 3.5 Data Hasil Pengukuran *Back* EMF

Kecepatan		V <sub>ggl-b</sub> (e) (volt)	K <sub>ggl-b</sub> = e/ω <sub>b</sub>
(rpm)	(rad/s)		
400	41,93	1,1	0,021
600	62,89	2,31	0,022
800	83,86	3,3	0,021
1000	104,8	4,19	0,020
Rata – rata			<b>0,021</b>

### 3.2.6 Identifikasi dan Pemodelan Beban BLDCM

Beban minimum diasumsikan berasal dari komponen gear transmisi dan berat kendaraan. Identifikasi parameter beban dilakukan untuk mengetahui nilai koefisien gesek (*friction*) ( $B_b$ ) dan momen inersia beban ( $J_b$ ).

#### 3.2.6.1 Identifikasi Koefisien Gesek

Beban minimum disimulasikan sebagai pembebanan rem elektromagnetik dengan torsi sebesar 0,02 N.m. Perubahan torsi rem sebanding dengan perubahan torsi motor dan dapat dihitung sebagai berikut:

$$K_{REM} = T_b = K_b \cdot I_b$$

$$\begin{aligned}
 I_b &= \frac{T_b}{K_b} \\
 &= \frac{0.02}{0.16} \\
 &= 0.125 A
 \end{aligned}$$

Berikut ini persamaan yang menunjukkan hubungan antara torsi BLDCM dan parameter beban :

$$T_b = J_b \frac{d\omega_b}{dt} + B_b \omega_b + T_L \quad (3.11)$$

$$T_b = K_b \cdot I_b \quad (3.12)$$

Pada saat tanpa beban  $T_L = 0$  dan keadaan *steady state*  $d\omega/dt = 0$  sehingga:

$$K_b \cdot I_b = J_b \cdot 0 + B_b \omega_b + 0 \quad (3.13)$$

$$B_b = \frac{K_b \cdot I_b}{\omega} \quad (3.14)$$

dimana,

- $T_b$  = torsi BLDCM  
 $J_b$  = momen inersia beban  
 $B_b$  = koefisien gesek (*friction*)  
 $I_b$  = arus BLDCM

Tahapan identifikasi :

- Hubungkan BLDCM dengan motor bakar melalui komponen gir transmisi.
- Atur kecepatan motor pada *range* 400-1000 rpm dengan interval 200rpm.
- Ukur arus motor.
- Atur tegangan rem elektronik sampai terjadi perubahan arus motor sebesar 0,125 A
- Hitung nilai koefisien gesek sesuai Persamaan (3.14).

Hasil pengujian untuk mendapatkan parameter koefisien gesek BLDCM ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Hasil Pengujian Koefisien Gesek Beban Minimal

Kecepatan Awal (rpm)	Arus Awal (A)	Arus Akhir (A)	Kecepatan Akhir (rpm)	Kecepatan Akhir (rad/s)	Koefisien Gesek (N.m sec/rad)
400	0,24	0,36	415	43,58	0,00134
600	0,37	0,49	572	60	0,00132
800	0,49	0,62	711	74,54	0,00132
1000	0,62	0,74	868	90,99	0,00131
<b>Rata-rata Koefisien Gesek</b>					<b>0,00132</b>

### 3.2.6.2 Identifikasi Momen Inersia

Tahapan selanjutnya adalah identifikasi parameter momen inersia beban  $J$ . Persamaan torsi motor  $T_M$  dan momen inersia sebagai berikut :

$$T_b = J_b \frac{d\omega_b}{dt} + B_b \omega_b \quad (3.15)$$

Dalam domain diskrit persamaan diatas menjadi :

$$T_b(k) = J_b \frac{\omega_b(k) - \omega_b(k-1)}{\Delta t} + B_b \omega_b(k)$$

$$T_b(k) = \frac{J_b}{\Delta t} \omega_b(k) - \frac{J_b}{\Delta t} \omega_b(k-1) + B_b \omega_b(k) \quad (3.16)$$

Dengan memberikan notasi  $\alpha$  dan  $\beta$  menjadi :

$$\underbrace{\left(\frac{J_b}{\Delta t} + B_b\right)}_{\alpha} \omega_b(k) - \underbrace{\left(\frac{J_b}{\Delta t}\right)}_{\beta} \omega_b(k-1) = T_b(k) \quad (3.17)$$

$$\alpha \omega_b(k) - \beta \omega_b(k-1) = T_b(k) \quad (3.18)$$

Persamaan (3.18) diubah ke bentuk *state* maka Persamaan (3.19).

$$\left[ \omega_b(k) - \omega_b(k-1) \right] \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = T_b(k) \quad (3.19)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \omega_b(2) & -\omega_b(1) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \omega_b(600) & -\omega_b(599) \end{bmatrix}}_Q \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} T_b(2) \\ \vdots \\ \vdots \\ T_b(600) \end{bmatrix}}_P \quad (3.20)$$

Dari Persamaan (3.20) didapatkan nilai  $\alpha$  dan  $\beta$  yang diberikan pada Persamaan (3.21).

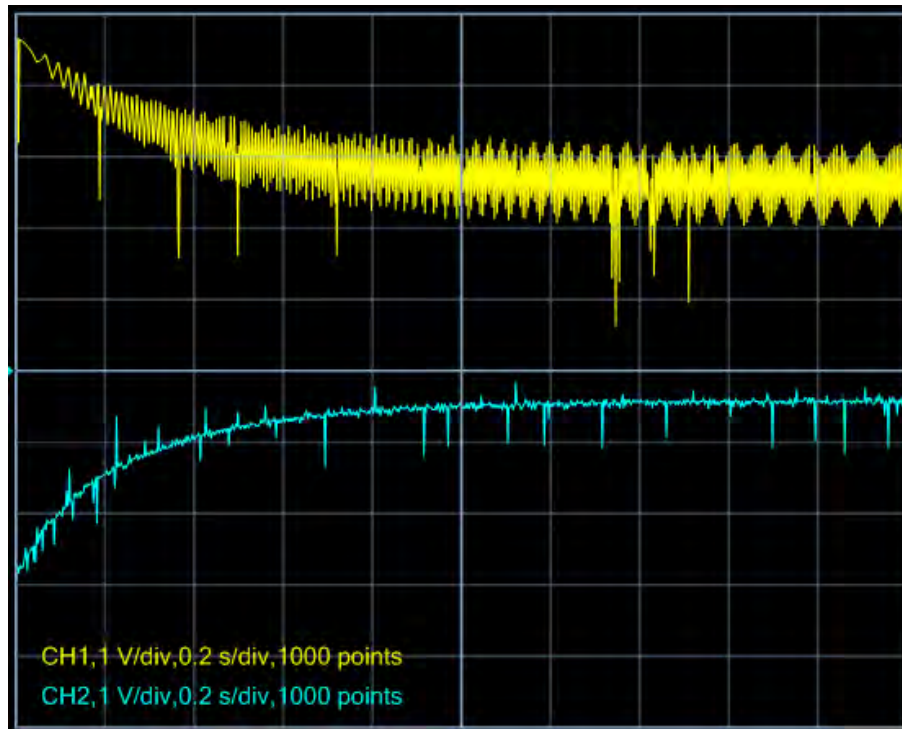
$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = (Q^T Q)^{-1} Q^T P \quad (3.21)$$

Nilai  $J_b$  kemudian dapat diperoleh dari Persamaan (3.22)

$$J_b = \beta \cdot \Delta t \quad (3.22)$$

Pada tahap identifikasi parameter momen inersia, BLDCM diberi sinyal input step hingga mencapai kecepatan 1000 rpm. Pada *oscilloscope* dilakukan pengamatan terhadap respon kecepatan dan arus transient (Gambar 3.12).

Dari hasil pengujian didapatkan data pengukuran sebanyak 500 dan  $\Delta t = 0,002s$ . Dengan memasukkan pada Persamaan (3.21), maka didapatkan nilai  $\beta$ .  
 $\beta = 0.1505$



Gambar 3.12 Respon Arus Transient dan Kecepatan Hasil Pengukuran

Dengan menggunakan Persamaan (3.22) didapatkan nilai momen inersia sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 J_b &= \beta \cdot \Delta t \\
 &= 0.1505 \times 0.002 \\
 &= 0.000301 \text{ kg.m}^2
 \end{aligned}$$

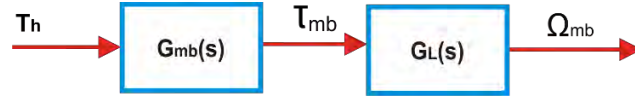
### 3.3 Perancangan dan Pemodelan Emulator Motor Bakar

Emulator motor bakar dirancang dari model motor DC dengan referensi model motor bakar. Pada Gambar 3.1 ditunjukkan blok diagram emulator motor bakar. Tahapan perancangan emulator yaitu: 1). mendapatkan model motor bakar dengan melakukan identifikasi dan pemodelan, 2). pemodelan emulator motor bakar.

#### 3.3.1 Identifikasi dan Pemodelan Motor Bakar

Proses identifikasi dilakukan dengan menganalisa respon motor bakar ketika diberikan masukan sinyal step. Metode yang digunakan untuk memperoleh

model motor bakar yaitu metode Strejc. Model matematis motor bakar secara keseluruhan ditunjukkan Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Blok Diagram Motor Bakar

dari Gambar 3.13 didapatkan persamaan kecepatan motor bakar:

$$\Omega_{mb} = T_h G(s) \quad (3.23)$$

dimana,

$$G(s) = G_{mb}(s) G_L(s) \quad (3.24)$$

Sehingga, didapatkan model dinamis dari motor bakar:

$$G_{mb}(s) = \frac{G(s)}{G_L(s)} \quad (3.25)$$

dengan:

$T_h$  : Persentase bukaan *throttle*

$G_{mb}$  : Motor bakar

$G_L$  : Beban

Identifikasi dilakukan dengan mengatur *throttle* motor bakar sebesar 50%, kemudian dilakukan pengamatan terhadap kecepatan motor bakar. Hasil pengamatan diperoleh respon kecepatan yang ditunjukkan pada Gambar 3.14. Dari respon tersebut kemudian dilakukan analisa untuk mendapatkan model motor bakar. Hasil pengamatan diperoleh nilai penguatan sebesar 2.0169, ini didapatkan dari Persamaan (3.26).

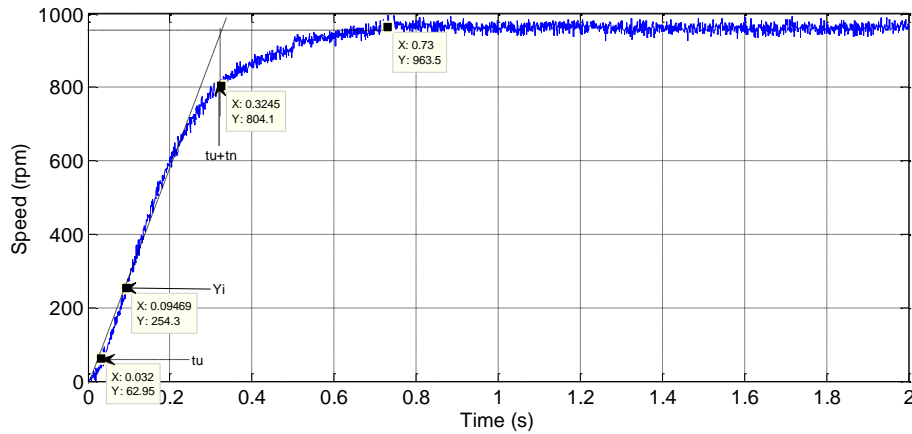
$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} \quad (3.26)$$

dengan,

$K$  : Penguatan

$Y_{ss}$  : Kecepatan pada *stady state* (rad/s)

$X_{ss}$  : Persentase bukaan *throttle*



Gambar 3.14 Respon Kecepatan Motor Bakar dan Titik Identifikasi

Tahapan berikutnya menentukan parameter titik awal belok ( $t_u$ ) dan titik akhir belok ( $t_n$ ), hal ini dilakukan dengan menarik garis singgung yang dijelaskan pada Gambar 3.14. berdasarkan hasil pengamatan diperoleh nilai  $t_u$  sebesar 0.032 dan  $t_n$  sebesar 0.2925. Kemudian dihitung nilai rasio waktu tunda, sehingga didapatkan nilai sebesar 0.1094. Nilai ini diperoleh berdasarkan Persamaan .

Pendekatan orde sistem diperoleh berdasarkan nilai  $\tau$  dan kemudian menentukan taksiran orde sesuai tabel. Dari pengamatan diperoleh pendekatan orde ke-2 dengan nilai  $y_i$  sebesar 0.264. Selanjutnya dicari nilai  $t_i$  yaitu nilai parameter waktu ketika respon sistem mencapai 0.264  $Y_{ss}$ .

$$\begin{aligned} y_i &= 0.264 \times Y_{ss} \\ &= 254.364 \text{ rpm} \\ t_i &= 0.0949 \end{aligned}$$

Waktu konstan  $\tau_{pm}$  dapat ditentukan berdasarkan Persamaan (2.28).

$$\begin{aligned} \tau_{pm} &= \frac{t_i}{n-1} = \frac{0.0949}{2-1} \\ &= 0.0949 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan pendekatan model orde ke-2 berdasarkan Persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{K}{(\tau_{pm}s + 1)^n} \\ &= \frac{2.0169}{(0.0949s + 1)^2} \end{aligned}$$

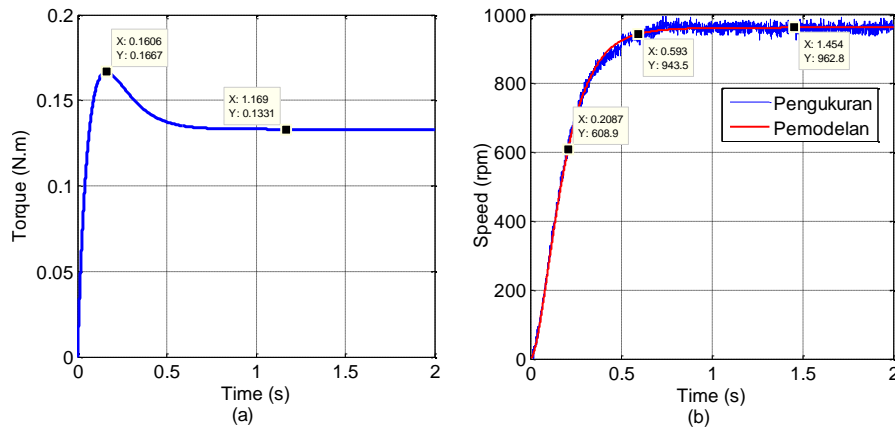
maka dapat diperoleh pemodelan motor bakar berdasarkan Pesamaan (3.25) sebagai berikut.

$$G_{mb}(s) = \frac{G(s)}{G_L(s)}$$

$$G_{mb}(s) = \frac{2.0169}{(0.0949s + 1)^2}$$

$$G_{mb}(s) = \frac{6.0507 \times 10^{-4} + 26.62308 \times 10^{-4}}{0.008966961s^2 + 0.18938s + 1}$$

Respon torsi dan kecepatan hasil pemodelan motor bakar ditunjukkan pada Gambar 3.15. Gambar 3.15 (a) merupakan respon torsi motor bakar, yang mana menunjukkan torsi starting sebesar 0.1667 N.m dan torsi steady state 0.1331N.m. Gambar 3.15 (b) menunjukkan respon kecepatan pengukuran dan pemodelan motor bakar.



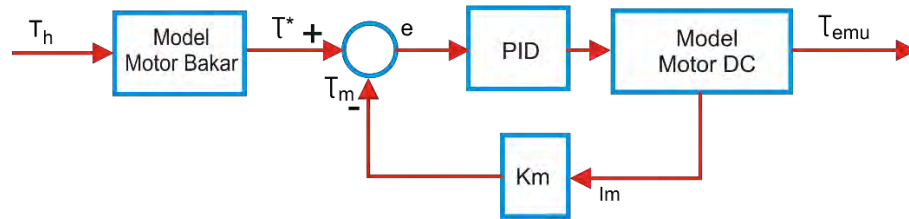
Gambar 3.15 Respon Torsi dan Kecepatan Pemodelan Motor Bakar

### 3.3.2 Perancangan Emulator Motor Bakar

Emulator motor bakar dirancang berdasarkan model motor DC dan motor bakar. Gambar 3.16 menjelaskan blok diagram perancangan emulator motor bakar. Model motor bakar diperoleh dari hasil identifikasi pada sub bab 3.3.1. yang menghasilkan sistem orde 2 yaitu:

$$G_{mb}(s) = \frac{6.0507 \times 10^{-4} + 26.62308 \times 10^{-4}}{0.008966961s^2 + 0.18938s + 1}$$





Gambar 3.16 Blok Diagram Perancangan Emulator Motor Bakar

Tabel 3.7 Parameter Motor DC [9]

No	Parameter	Nilai
1	Tahanan jangkar ( $R_a$ )	19,7480 ohm
3	Tahanan medan ( $R_f$ )	2377.12 ohm
4	Induktansi jangkar ( $L_a$ )	0,09116 H
5	Induktansi Medan ( $L_f$ )	23,34400 H
6	Konstanta torsi motor DC ( $K_{tm}$ )	0,624
7	Konstanta <i>Back</i> EMF ( $K_{ggl}$ )	0,7154 V/rad/s
8	Inersia ( $J_m$ )	0,00001231 kg.m <sup>2</sup>
9	Koefisien Gesek motor ( $B_m$ )	0,00002462 N.m/rad/s
10	Koefisien Gesek Rem Elektronik ( $B_i$ )	0,0008753 N.m/rad/s

Motor DC yang digunakan yaitu motor DC konfigurasi parallel. Parameter yang digunakan berdasarkan hasil penelitian sebelumnya (Tabel 3.7). Untuk mengatur torsi motor DC ini, maka torsi yang terukur diestimasi dari arus motor. Torsi motor bakar diberikan pada Persamaan (3.27).

$$T_m = K_m I_m \quad (3.27)$$

dengan  $I_m$  merupakan arus total motor DC yang didapatkan dari Persamaan (3.38).

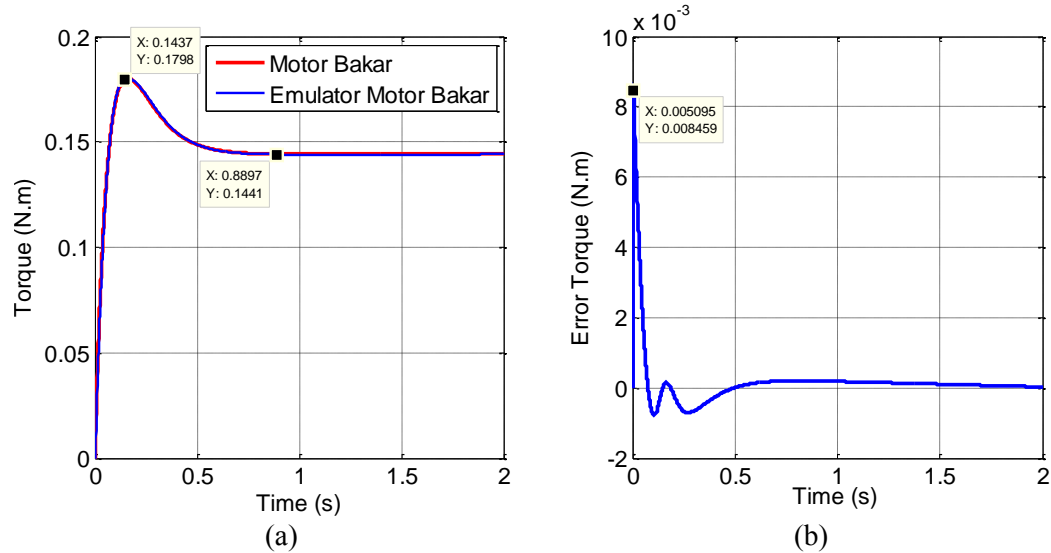
$$I_m = I_a I_f \quad (3.28)$$

dengan  $I_a$  dan  $I_f$  diberikan oleh Persamaan (2.13) dan (2.16).

Model motor bakar berfungsi sebagai model referensi untuk motor DC. Agar motor DC dapat mengikuti respon torsi motor bakar, maka pada motor DC dilakukan pengaturan torsi. Pengaturan torsi motor bakar menggunakan kontroller PID. Parameter kontroller PID didapatkan dengan cara *tray and error*. Sehingga didapatkan nilai gain terbaik  $P=5250$ ,  $I=45$  dan  $D=4.29$ .

Respon torsi pemodelan emulator motor bakar ditunjukkan pada Gambar 3.17. Gambar 3.17 (a) merupakan respon torsi emulator motor bakar, yang mana menunjukkan torsi *starting* sebesar 0.1798 N.m dan *torsi steady state* 0.1441N.m. Gambar 3.15 (b) menunjukkan respon *error* emulator motor bakar, yang mana nilai

*error* terbesar terjadi pada waktu ke 0.005095s dengan nilai *error* 0.008459 N.m. Nilai RMSE pada respon torsi emulator motor bakar sebesar  $4.2543 \times 10^{-4}$  N.m.



Gambar 3.17 Respon Torsi dan Error Torsi Emulator Motor Bakar

### 3.4 Perancangan dan Pemodelan Roda Gigi

Pada Gambar 3.2 memperlihatkan bahwa pada shaft BLDCM diberikan roda gigi dan *timing belt* sebagai penghubung ke shaft utama. Shaft utama merupakan poros penanggung beban. Emulator motor bakar dipasang satu shaft dengan beban.

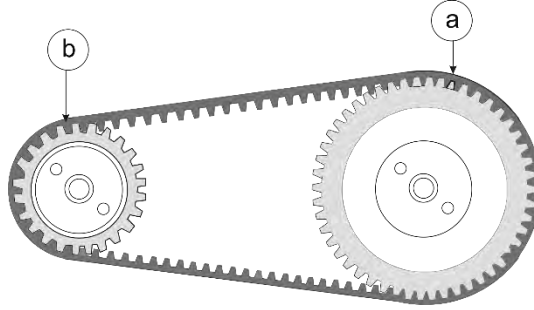
Berdasarkan data emulator dan BLDCM, kecepatan emulator (0-1500 rpm) setengah lebih kecil dari kecepatan BLDCM (0-3000 rpm). Oleh karena itu dibutuhkan transmisi gir untuk mereduksi secara *proportional* kecepatan BLDCM agar sebanding dengan rentang kecepatan emulator. Dengan menggunakan Persamaan (2.5), maka diperoleh kecepatan sudut ( $\omega$ ) masing-masing penggerak.  $\omega_{emu}$  sebesar 157 rad/s dan  $\omega_b$  sebesar 314 rad/s. Dari Persamaan (2.21) dapat dihitung perbandingan gir yang akan digunakan.

$$\frac{\omega_{emu}}{\omega_b} = \frac{r_b}{r_{emu}}$$

diasumsikan  $r_b = 1$ , maka nilai  $r_{emu}$  adalah

$$r_{emu} = \frac{314}{157} 1 = 2$$

Hasil rancangan roda gigi ditunjukkan pada Gambar 3.18. Jika  $\omega_{emu} = \omega_a$  dan  $r_{emu} = r_a$  maka perbandingan gir  $r_a : r_b = 2 : 1$ .



Gambar 3.18 Rancangan Transmisi Gir

Dari Persamaan (2.24) dapat diketahui torsi dan jari-jari roda gigi sebanding, maka didapatkan:

$$\frac{\omega_a}{\omega_b} = \frac{r_b}{r_a} = \frac{T_b}{T_a} \quad (3.29)$$

dari Persamaan (3.31), maka didapatkan hubungan antara torsi dan kecepatan sebagai berikut:

$$T_a \omega_a = T_b \omega_b \quad (3.30)$$

Roda gigi yang digunakan memiliki momen inersia roda gigi ( $J_g$ ) berputar dan gaya gesek ( $B_g$ ) dalam sistem yang lengkap. Penggunaan roda gigi akan mengubah persamaan mekanik pada motor. Berikut persamaan torsi mekanik yang dihasilkan dari putaran BLDCM.

$$(J_b S + B_b) \omega_b = T_b \quad (3.31)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2.21) dan (3.31) ke (3.30) akan diketahui hubungan antara motor dan roda gigi yang digunakan:

$$(J_b S + B_b) \frac{r_a}{r_b} \omega_b = T_a \quad (3.32)$$

$$(J_b S + B_b) \left( \frac{r_a}{r_b} \right)^2 \omega_a = T_a \quad (3.33)$$

Sehingga persamaan ekuivalen dari mekanik BLDCM setelah direduksi kecepatannya dengan roda gigi dan *timing belt* menjadi

$$\left( J_g + J_b \left( \frac{r_a}{r_b} \right)^2 + B_g + B_b \left( \frac{r_a}{r_b} \right)^2 \right) \omega_a = T_a \quad (3.34)$$

### 3.5 Perancangan dan Pemodelan Beban HEV

Beban pada HEV terbagi menjadi beban minimum kendaraan, beban minimum emulator motor bakar dan beban minimum BLDCM serta gangguan beban luar. Pemodelan beban pada HEV dijelaskan berikut ini:

#### 3.5.1 Pemodelan Beban Minimum

Torsi HEV merupakan gabungan torsi emulator, BLDCM dan torsi beban yang diberikan pada Persamaan (3.35).

$$T_{HEV} = (T_{emu} + T_b) + (T_v + T_L) \quad (3.35)$$

dengan beban minimum emulator motor bakar diberikan pada Persamaan (3.36).

$$(J_m s + B_m + B_l) \omega_{emu} = T_{emu} \quad (3.36)$$

Beban minimum BLDCM diberikan dari Persamaan (3.34), dengan mengabaikan nilai inersia dan redaman pada roda gigi sehingga diperoleh Persamaan (3.37).

$$(J_b s + B_b) \frac{r_a}{r_b} \omega_b = T_b \quad (3.37)$$

Beban kendaraan dan penumpang diberikan oleh Persamaan (3.38). Namun pada Penelitian ini merupakan simulator HEV, dimana beban kendaraan diasumsikan diberikan oleh rem elektromagnetik ( $B_l$ ). Nilai rem elektromagnetik ini didapatkan dari hasil Penelitian sebelumnya (Tabel 3.7).

$$M_v \frac{dv}{dt} r_w = T_v \quad (3.38)$$

dengan,

$M_v$  : Massa HEV (kg)

$v$  : Kecepatan Linear HEV (m/s)

$r_w$  : Jari-jari roda HEV (m)

Sehingga didapatkan persamaan keseluruhan yaitu:

$$T_{HEV} = \left[ \left( J_m + J_b \frac{r_a}{r_b} \right) s + \left( B_l + B_m + B_b \frac{r_a}{r_b} \right) \right] \omega_v + T_L \quad (3.39)$$

### 3.5.2 Pemodelan Beban Luar

Beban luar merupakan pengaruh beban pada kendaraan yang akan menimbulkan torsi luar ( $T_L$ ) yang mempengaruhi kecepatan HEV. Pada penelitian ini gangguan yang dibahas yaitu kondisi kendaraan saat pendakian. Torsi beban dinyatakan sebagai fungsi gangguan pada kondisi kendaraan saat pendakian. Pada kondisi ini terjadi gaya  $F_{rg}$ . Gaya  $F_{rg}$  diberikan pada Persamaan (3.53) dan ditunjukkan pada Gambar 3.19.

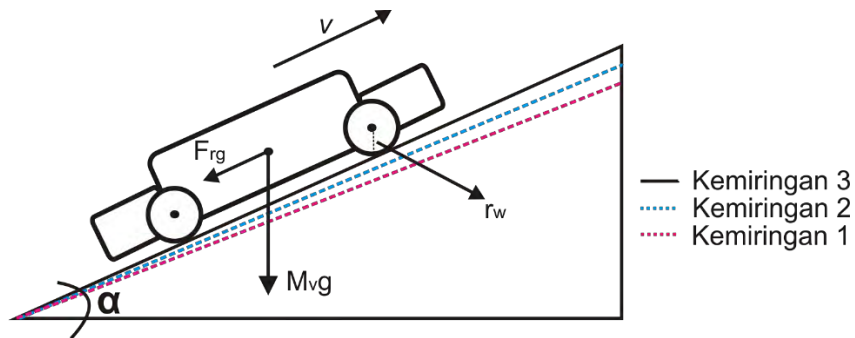
$$F_{rg} = M_v g \sin\left(\frac{\alpha\pi}{180^\circ}\right) \quad (3.40)$$

dengan  $\alpha$  merupakan sudut kemiringan jalan dan berat HEV disimulasikan dengan pembebanan rem elektromagnetik. Sehingga Persamaan (3.40) diubah menjadi Persamaan (3.42).

$$F_{rg} = B_l \sin\left(\frac{\alpha\pi}{180^\circ}\right) \quad (3.41)$$

Gaya  $F_{rg}$  ini terjadi melalui roda kendaraan sehingga didapatkan model torsi beban luar yang diberikan pada Persamaan (3.42).

$$T_L = F_{rg} r_w \quad (3.42)$$



Gambar 3.19 Model Beban Luar HEV

### 3.6 Model Referensi

Model referensi merupakan model acuan bagi kontroler untuk mempercepat respon HEV. Model referensi dirancang berdasarkan model motor

bakar. Model yang dirancang ada dua yaitu a) model yang memiliki *rise time* dan *settling time* yang lebih cepat dari model motor bakar untuk menguji saat akselerasi dan b) model dengan respon sesuai dengan nilai standar akselerasi yaitu <12 detik [1], namun pada penelitian ini nilai akselerasi yang diinginkan < 5 detik.

a. Model Referensi 1

Dari respon identifikasi motor bakar (Gambar 3.15.b) didapat nilai *time constant* sebesar 0,208s dan *settling time* sebesar 0,832s. Model referensi pertama dirancang harus memiliki *settling time* yang lebih cepat, sehingga dipilih nilai *settling time* sebesar 0,416s dan didapat nilai *time constant* sebesar 0,104s. Sehingga model referensi diberikan pada Persamaan (3.43).

$$G(s) = \frac{2.0169}{0,104s + 1} \quad (3.43)$$

b. Model Referensi 2

Sama halnya dengan model referensi pertama berdasarkan respon identifikasi motor bakar (Gambar 3.15.b). Model referensi kedua dirancang memiliki nilai *settling time* kecil dari nilai standar akselerasi yang ditetapkan, sehingga dipilih nilai *settling time* sebesar 0,416s dan didapat nilai *time constant* sebesar 1,66s. Sehingga model referensi diberikan pada Persamaan (3.44).

$$G(s) = \frac{2.0169}{0.416s + 1} \quad (3.44)$$

### 3.7 Perancangan Strategi Pengaturan Torsi HEV

Strategi pengaturan torsi HEV merupakan strategi pembagian kerja kedua penggerak HEV. Strategi ini dilakukan dengan membuat distribusi torsi yang dibutuhkan oleh emulator motor bakar dan BLDCM. Torsi yang diberikan oleh emulator diasumsikan sudah stabil, sesuai pada sub bab 3.3. Sementara torsi yang diberikan BLDCM dirancang berdasarkan kebutuhan torsi HEV. Pada tahap ini dibahas mengenai torsi distributor dan perancangan *fuzzy-PI controller*.

### 3.7.1 Torsi Distributor

Torsi distributor diperoleh melalui model invers beban. Dengan mensubstitusikan nilai momen inersia dan koefisien gesek didapatkan Persamaan (3.45).

$$\begin{aligned} G_L(s) &= \frac{1}{J_{emu}s + B_{emu}} \\ &= \frac{1}{3 \cdot 10^{-4}s + 13,2 \cdot 10^{-4}} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Persamaan (3.45) diubah ke persamaan diskrit dengan mensubstitusikan Persamaan (3.46).

$$s = \frac{2}{T_s} \left( \frac{z-1}{z+1} \right) \quad (3.46)$$

Sehingga diperoleh  $G_L$  sebagai berikut:

$$\begin{aligned} G_L(z) &= \frac{1}{3 \cdot 10^{-4} \frac{2}{T_s} \left( \frac{z-1}{z+1} \right) + 13,2 \cdot 10^{-4}} \\ &= \frac{(z+1)}{3 \cdot 10^{-4} \frac{2}{T_s} (z-1) + 13,2 \cdot 10^{-4}(z+1)} \\ &= \frac{(z+1)}{\left( \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{T_s} + 13,2 \cdot 10^{-4} \right) z + \left( 13,2 \cdot 10^{-4} - \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{T_s} \right)} \end{aligned}$$

Dengan nilai time sampling  $T_s = 0,00001$ , maka didapatkan :

$$\begin{aligned} G_L(z) &= \frac{(z+1)}{(60 + 13,2 \cdot 10^{-4})z + (13,2 \cdot 10^{-4} - 60)} \\ &= \frac{(z+1)}{60,00132z - 59,9986} \\ &= \frac{0,01667z + 0,01667}{z - 0,9999} \cong \frac{0,01667z + 0,01667}{z - 1} \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan Persamaan (3.47).

$$G_L(z) = \frac{\omega(z)}{\tau(z)} = \frac{0,01667z + 0,01667}{z - 1} \quad (3.47)$$

$$(z - 1) \omega(z) = (0,01667z + 0,01667) \tau(z)$$

Dengan mengalikan  $z^{-1}$  maka didapatkan (z) :

$$(z \cdot z^{-1} - z^{-1}) \omega(z) = (0,01667z \cdot z^{-1} + 0,01667 \cdot z^{-1}) \tau(z)$$

$$(1 - z^{-1}) \omega(z) = (0,01667 + 0,01667 z^{-1}) \tau(z)$$

$$\omega(z) - z^{-1} \omega(z) = 0,01667\tau(z) + 0,01667 z^{-1} \tau(z)$$

$$\omega(z) = z^{-1} \omega(z) + 0,01667\tau(z) + 0,01667z^{-1}\tau(z) \quad (3.48)$$

Persamaan (3.48) diubah ke dalam bentuk differensial sehingga menjadi Persamaan (3.49).

$$\omega(k) = \omega(k-1) + 0,01667\tau(k) + 0,01667\tau(k-1) \quad (3.49)$$

Dari Persamaan (3.49) dapat ditentukan invers model untuk mengkonversi input error kecepatan menjadi torsi referensi BLDCM yaitu:

$$0,01667\tau(k) = \omega(k) - \omega(k-1) - 0,01667\tau(k-1)$$

$$\tau(k) = 59,988\omega(k) - 59,988\omega(k-1) - \tau(k-1) \quad (3.50)$$

Sehingga torsi referensi BLDCM didapatkan dari Persamaan (3.51).

$$T_{ref\ BLDCM} = \tau(k) = 59,988\omega(k) - 59,988\omega(k-1) - \tau(k-1) \quad (3.51)$$

### 3.7.2 Perancangan Kontroler *Fuzzy*-PI

Pengaturan torsi BLDCM dilakukan dengan mengatur torsi BLDCM secara langsung. Pada tahap ini dirancang kontroller *fuzzy*-PI. Persamaan kontroler PI diberikan pada Persamaan (3.52).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.52)$$

Error torsi diperoleh dari Persamaan (3.55).

$$e(t) = T_{rb}(t) - T_{est*}(t) \quad (3.53)$$

dimana torsi estimasi BLDCM adalah:



$$T_{est}^*(t) = I_{tb}(t)K_b(t) \quad (3.54)$$

Arus total BLDCM diperoleh dari Persamaan (3.55).

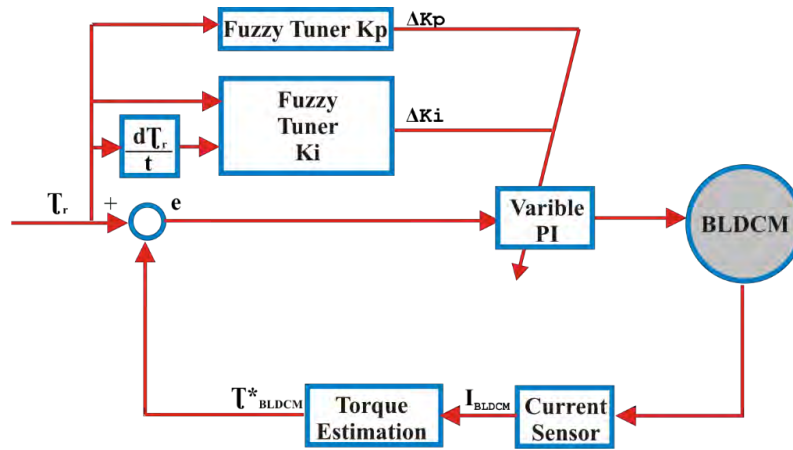
$$I_{tb} = \frac{abs(I_a + I_b + I_c)}{2} \quad (3.55)$$

Nilai  $K_p$  dan  $K_i$  selalu di-update dengan Persamaan (3.56) dan (3.57).

$$K_p = K_p' + \Delta K_p \quad (3.56)$$

$$K_i = K_i' + \Delta K_i \quad (3.57)$$

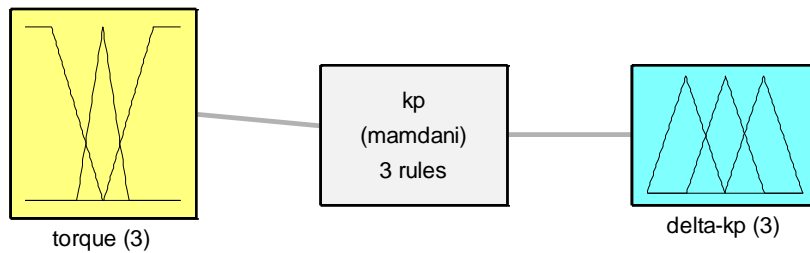
$K_p'$  merupakan gain  $K_p$  dan  $K_i'$  merupakan gain  $K_i$  sebelum waktu ke- $t$



Gambar 3.20. Blok Diagram Kontrol Torsi BLDCM dengan Kontroler *Fuzzy*-PI

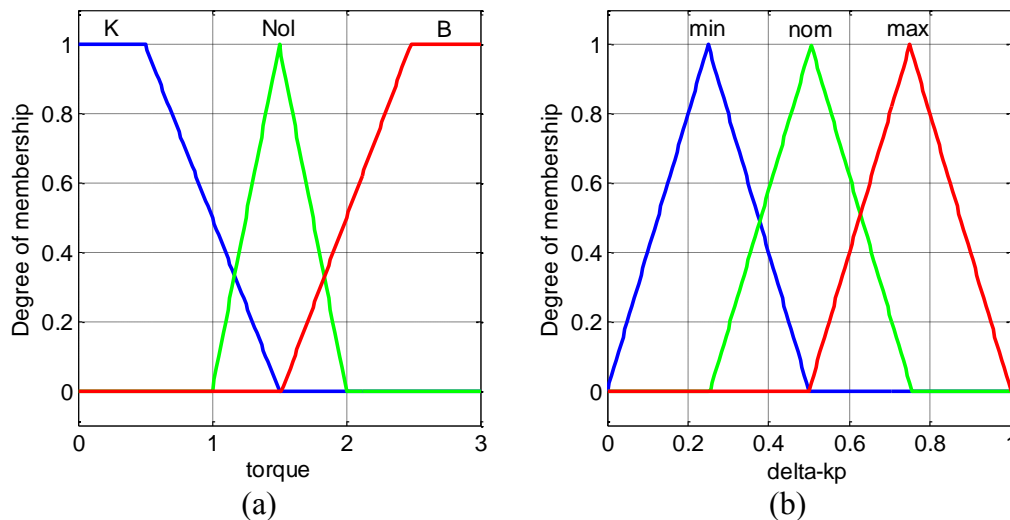
Skema kontroler *fuzzy*-PI dapat dilihat pada Gambar 3.20. “variabel PI” merupakan kontroler PI yang parameter  $K_p$  dan  $K_i$  dapat diubah. Pengaturan torsi BLDCM menggunakan kontroler PI. Kontroler *fuzzy* digunakan untuk men-tuning parameter kontroler PI.

Kontroler *fuzzy* yang dirancang terdiri dari dua yaitu pertama untuk men-tuning parameter  $K_p$  dan yang kedua untuk mentuning parameter  $K_i$ . *Fuzzy control tuner*  $K_p$  terdiri dari satu *input* dan satu *output* (Gambar 3.21). Masukan kontroler *fuzzy* yaitu torsi referensi dan keluaran yaitu  $\Delta K_p$ . *Fuzzy control tuner*  $K_i$  terdiri dari dua *input* (torsi referensi dan perubahan torsi referensi) dan satu *output* yaitu  $\Delta K_i$  (Gambar 3.23).

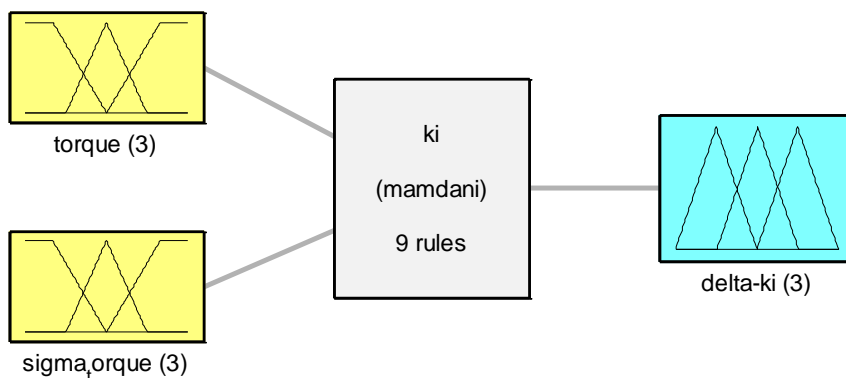


Gambar 3.21. *Inference Fuzzy Tuner  $K_p$*

Masing-masing *input* dan *output* menggunakan 3 *membership function* untuk *input* torsi dan 3 *membership function* untuk *output*  $\Delta K_p$ . Range pada *input* torsi adalah [0 3]. Range pada *output*  $\Delta K_p$  adalah [0 1]. *Membership function* torsi dan *output*  $\Delta K_p$  ditunjukkan pada Gambar 3.22.



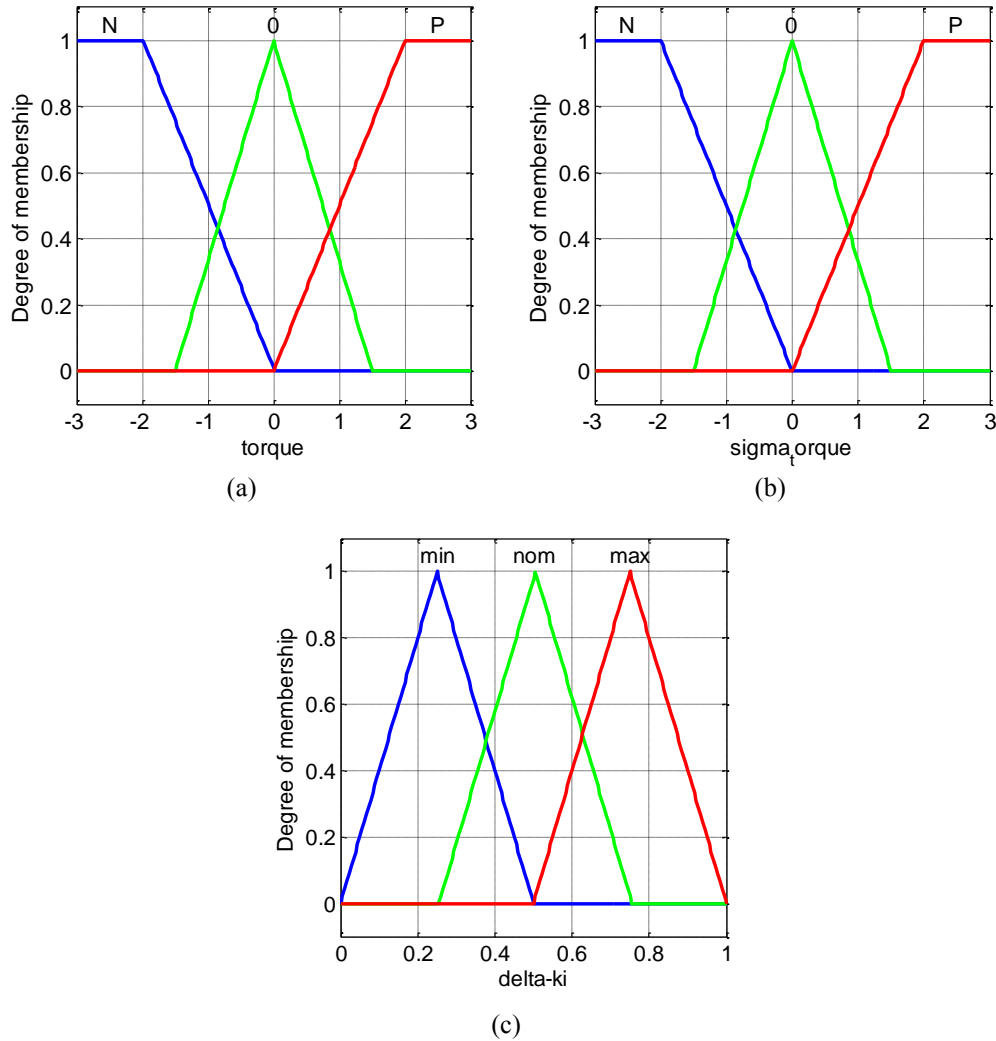
Gambar 3.22. *Membership Function Tuner  $K_p$ , (a) Input Torsi, (b) Output  $\Delta K_p$*



Gambar 3.23. *Inference Fuzzy Tuner  $K_i$*

Masing-masing *input* dan *output* menggunakan 3 *membership function* untuk *input* torsi dan  $\Sigma T$  serta 3 *membership function* untuk *output*  $\Delta K_i$ . Range

pada *input* torsi adalah  $[-3 \ 3]$  dan *range input*  $\Sigma T$  adalah  $[-3 \ 3]$ . *Range* pada *output*  $\Delta K_i$  adalah  $[0 \ 1]$ . *Membership function* pada *input torque* ,  $\Sigma T$  dan *output*  $\Delta K_i$  ditunjukkan pada Gambar 3.24.



Gambar 3.24. *Membership Function Tuner  $K_i$* , (a) *Input Torsi*, (b) *Input  $\Sigma$ torsi*, (c) *Output  $\Delta K_i$*

*Rule base* yang dirancang untuk mentuning parameter  $K_p$  dijelaskan sebagai berikut:

- Jika  $T = K$ , maka  $\Delta K_p = \text{Min}$  (3.58)

- Jika  $T = B$ , maka  $\Delta K_p = \text{Max}$  (3.59)

- Jika  $T = \text{NoI}$ , maka  $\Delta K_p = \text{Nominal}$  (3.60)

*Rule base* yang dirancang untuk mentuning parameter  $K_i$  dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Rule Base *Tuner K<sub>i</sub>*

		$\Sigma$ Torque		
		N	O	P
Torque	N	Max	Max	Nom
	O	Max	Nom	Min
	P	Nom	Min	Min

Variabel *output* untuk pengaturan torsi BLDCM merupakan variabel kenaikan sinyal tegangan. Untuk mengetahui besarnya tegangan rata-rata yang diberikan ke driver BLDCM berdasarkan besarnya nilai *duty cycle* yang diberikan pada Persamaan (3.61).

$$V_o = \frac{a}{a+b} V_{in} \quad (3.61)$$

dengan:

$V_o$  : nilai tegangan keluaran

$a$  : T *on*

$b$  : T *off*

$V_{in}$  : tegangan masukan

### 3.8 Perancangan Simulasi

Pada Tesis ini digunakan perangkat Matlab-Simulink untuk melakukan perancangan sistem dan kontrol. Terdapat beberapa blok bagian dari keseluruhan sistem, yaitu emulator motor bakar, kontroller *fuzzy*-PI, torsi distributor, BLDCM, beban, torsi motor estimator, dan model referensi.

- Emulator motor bakar, merupakan blok simulink bentuk pemodelan dari emulator motor bakar. Pemodelan diperoleh dari hasil identifikasi dan pemodelan sistem yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Keluaran emulator berupa torsi emulator motor bakar.
- Kontroler *fuzzy*-PI, merupakan blok kontroler yang digunakan untuk melakukan tuning parameter K<sub>p</sub> dan K<sub>i</sub> pada pengaturan torsi BLDCM Blok kontroler *neuro-fuzzy* menghasilkan keluaran berupa sinyal kontrol yang akan diolah oleh aktuator.
- Torsi distributor, merupakan blok simulink yang digunakan untuk menghitung kebutuhan BLDCM. Keluaran dari blok simulink ini berupa nilai torsi yang dijadikan referensi motor BLDCM

- d. BLDCM merupakan blok simulink bentuk pemodelan dari BLDCM. Beberapa parameter yang terdapat pada blok simulink diperoleh dari hasil identifikasi dan pemodelan sistem yang telah dijelaskan sebelumnya. Keluaran dari BLDCM berupa torsi yang digunakan untuk membantu emulator mencapai kecepatan yang diinginkan.
- e. Beban, merupakan blok simulink bentuk pemodelan dari beban. Beban pada sistem HEV berupa rem elektromagnetik. Pemodelan pada beban diperoleh dari hasil identifikasi dan pemodelan beban yang telah dijelaskan pada sub sebelumnya.

Blok keseluruhan perancangan Matlab-Simulink dapat dilihat pada Lampiran 3.

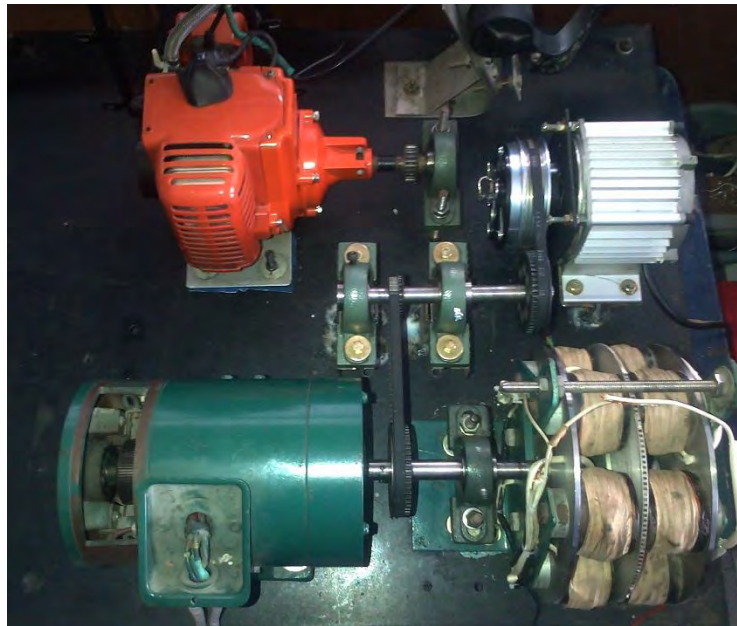
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Perancangan Konstruksi Mekanik Simulator HEV

Hasil perancangan konstruksi mekanik HEV adalah simulator HEV secara keseluruhan. Adapun hasil perancangan secara keseluruhan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Perancangan Konstruksi Mekanik HEV

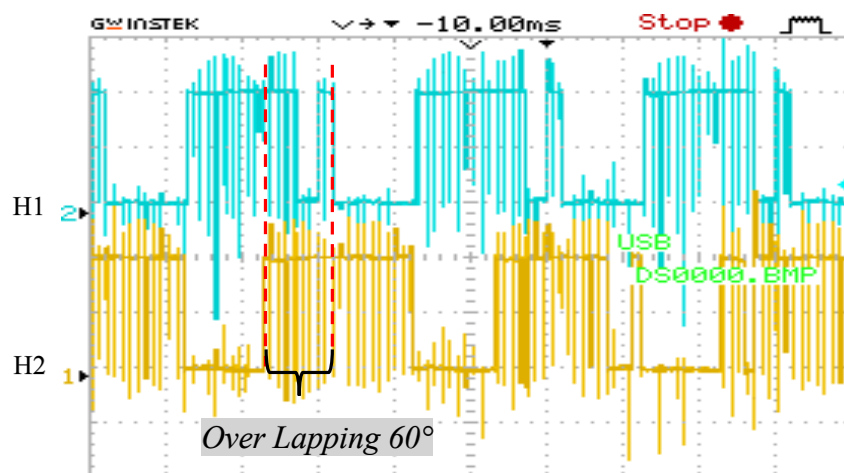
Berdasarkan Gambar 4.1, dapat dilihat bahwa simulator HEV terdiri dari beberapa komponen penyusun, diantaranya emulator motor bakar, BLDCM, rem elektromagnetik dan transmisi *gear* serta pedal gas. Konstruksi simulator HEV ini disusun secara paralel, dimana emulator motor bakar terhubung langsung (satu poros) dengan beban. Sementara BLDCM menggunakan transmisi *gear* sebagai penghubung ke poros utama. Transmisi *gear* ini digunakan untuk mereduksi kecepatan BLDCM. BLDCM akan aktif ketika emulator motor bakar kekurangan torsi untuk menggerakkan beban. Pada BLDCM terdapat kopling elektromagnetik untuk menghubungkan dan memutuskan energi ke poros utama.

## 4.2 Pengujian *Self Comutation* BLDCM

Pengujian BLDCM terdiri dari pengujian driver dan pengujian BLDCM secara keseluruhan. Hal ini bertujuan untuk melihat respon BLDCM hasil perancangan. Pengujian dilakukan secara *open loop* dengan memberikan sinyal kontrol PWM sebesar 100%. Frekuensi sinyal PWM sebesar 20 KHz.

### 4.2.1 Hasil Perancangan Driver BLDCM dengan Metode *Self Comutation*

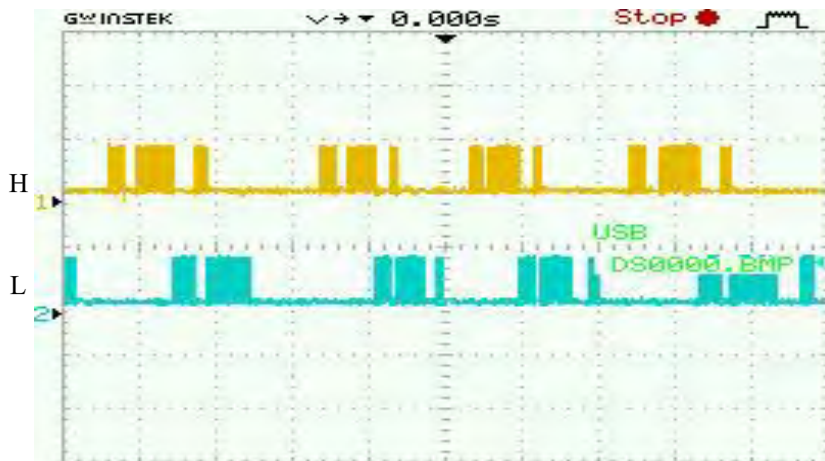
Gambar 4.2 menunjukkan sinyal *output* hasil pembacaan *effect hall* pada BLDCM, dengan beda sudut komutasi  $120^\circ$  dan *over lapping*  $60^\circ$ . Sinyal pembacaan *effect hall* dipengaruhi oleh letak posisi sensor pada *stator*. Selain itu, pada gambar juga terlihat adanya sinyal yang cacat. Hal tersebut, disebabkan oleh jarak antara magnet pada *rotor* terdapat renggang.



Gambar 4.2 Sinyal *Output* Pembacaan *Effect Hall*

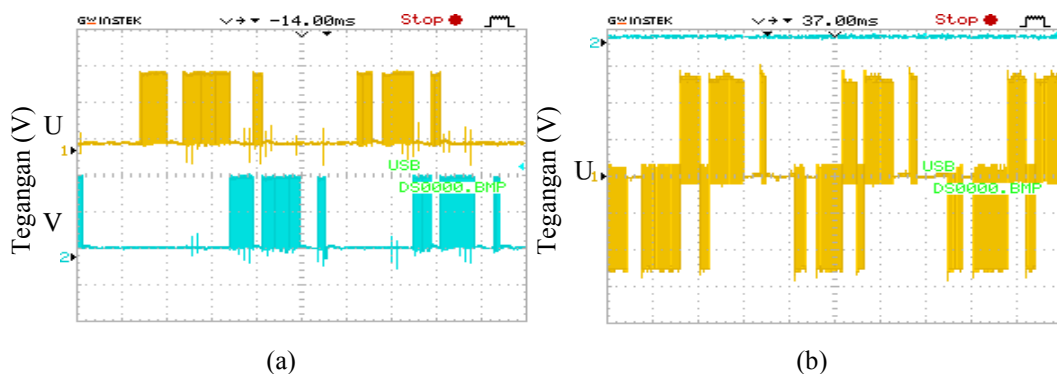
Gambar 4.3 menunjukkan respon *output* dari rangkaian *logic commutation*. Respon rangkaian ini telah digabung dengan PWM. Hasil perancangan *skema* driver BLDCM yang menggunakan metode *self commutation*, yaitu berupa hasil pengukuran yang menggambarkan karakteristik *output* dari metode *self commutation*.





Gambar 4.3 Sinyal Output Rangkaian *Logic Commutation* dengan PWM

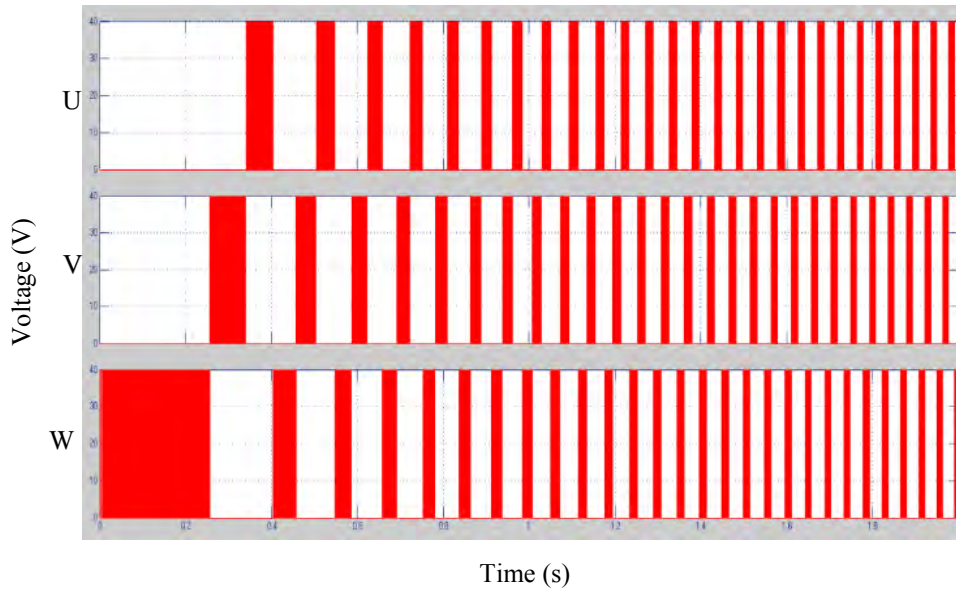
Gambar 4.3 menunjukkan bahwa pada sudut komutasi sudah tidak terjadi *over lapping*  $60^\circ$  dan telah digabung dengan PWM. Tetapi masih terdapat sinyal yang cacat, seperti halnya pada *output hall effect*. Oleh karena dengan terjadinya sinyal yang cacat pada *output hall effect*, akan mengakibatkan semua sinyal dari sistem *driver self commutation* menjadi cacat. Gambar 4.4 (a) *line-to-netral*, dan Gambar 4.4 (b) *line-to-line* menunjukkan terjadi cacat pada sinyal *output power electronic*.



Gambar 4.4 Output *Power Electronic*, (a) *line-to-netral*, (b) *line-to-line*

Adapun karakteristik *output* dari metode *self commutation*, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.6. Pada gambar, terlihat bahwa terjadi perbedaan lebar pulsa komutasi pada masing-masing *output* fasa. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada saat kondisi *start* awal, *rotor* digeret oleh fasa pertama. Kemudian dalam waktu tertentu berganti ke fasa kedua, dan berganti ke fasa ketiga. Setelah itu kembali lagi ke fasa yang pertama dan demikian seterusnya, sampai lebar pulsa

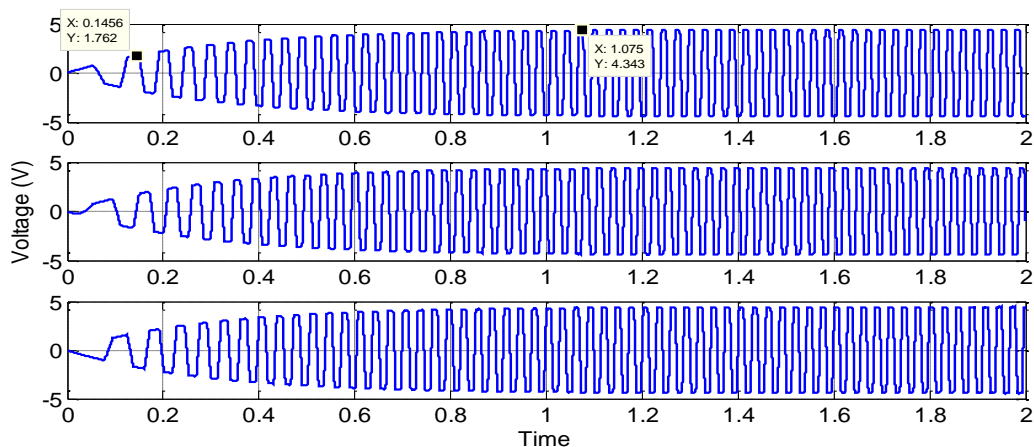
komutasi masing-masing fasa akan sama. Apabila lebar pulsa masing-masing fasa telah sama, maka hal tersebut menunjukkan bahwa keadaan putaran rotor berada pada kondisi *steady state*.



Gambar 4.5 Karakteristik Output Metode *Self Commutation*

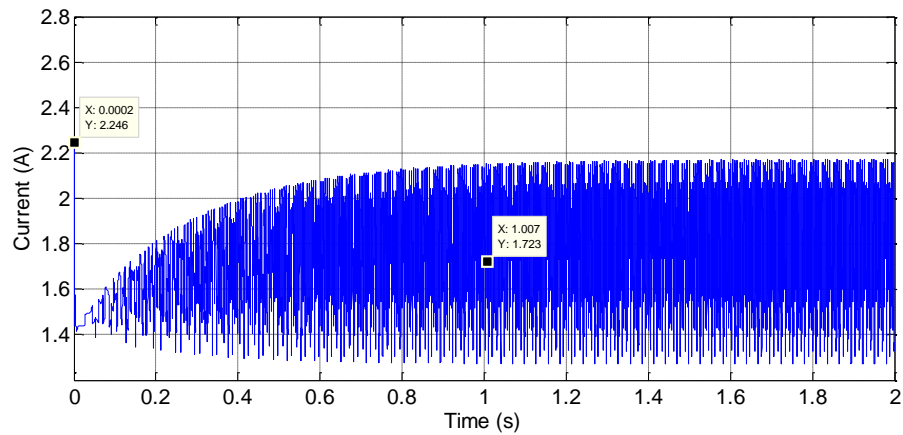
#### 4.2.2 Pengujian BLDCM

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respon kecepatan BLDCM ketika dihubungkan dengan beban minimal. Pengamatan terhadap *back* EMF pada kondisi *steady state* (Gambar 4.6) dapat dilihat nilai *back* EMF 4.343 V dengan periode sinyal 1.075s.



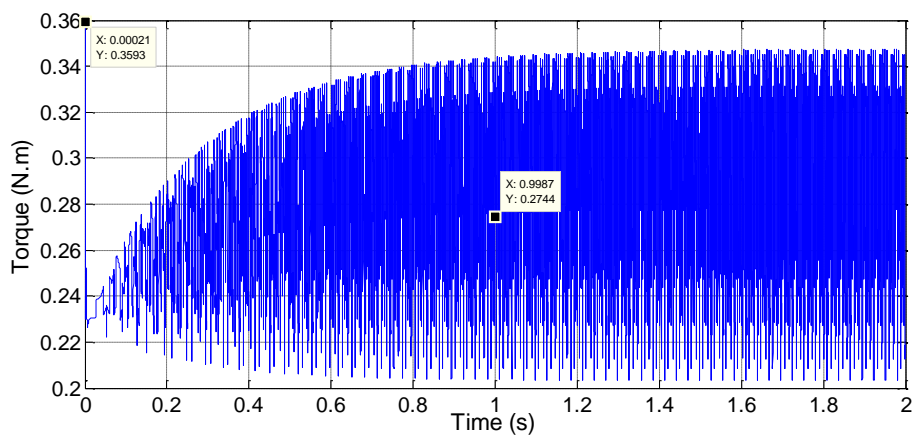
Gambar 4.6 Respon *Back* EMF BLDCM

Pengamatan terhadap arus total BLDCM pada kondisi *starting* dan *steady state* (Gambar 4.7) dapat dilihat bahwa arus *starting* bernilai 2.246 A dan pada kondisi *steady state* 1.723 A.



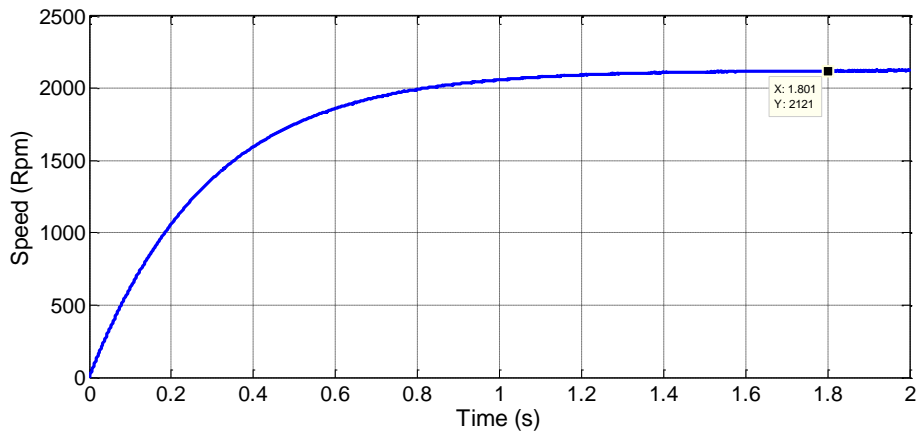
Gambar 4.7 Respon Arus BLDCM

Pengamatan terhadap torsi BLDCM pada kondisi *starting* dan *steady state* (Gambar 4.8) dapat dilihat bahwa torsi *starting* bernilai= 0.3594 N.m dan pada kondisi *steady state*=0.02744 N.m.



Gambar 4.8 Respon Torsi BLDCM

Respon kecepatan BLDCM (Gambar 4.9) menunjukkan bahwa kecepatan *steady state* BLDCM = 2121 rpm pada waktu = 1,1 s.



Gambar 4.9 Respon Kecepatan BLDCM

Semua hasil pengujian BLDCM diberikan pada Tabel 4.1.

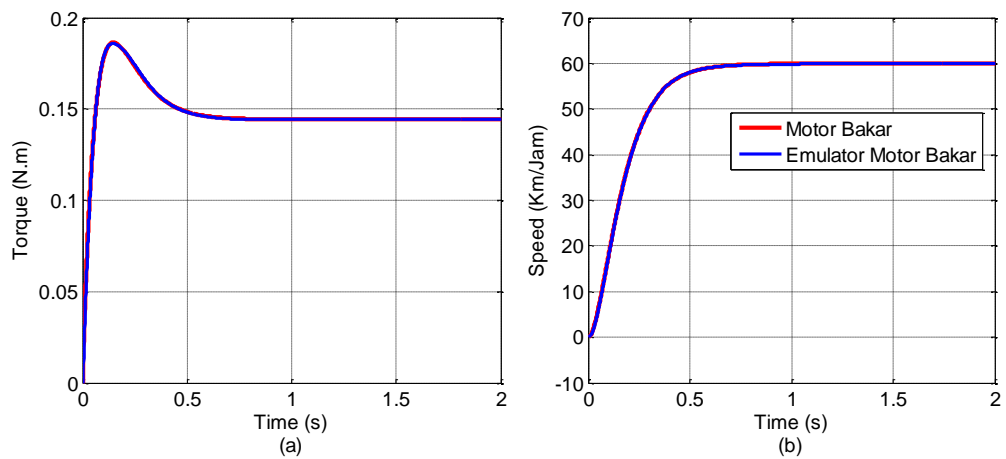
Tabel 4.1 Hasil Pengujian BLDCM

Back EMF Steady State (V)	Arus BLDCM Steady State (A)	Torque BLDCM Steady State (N.m)	Kecepatan BLDCM Steady State (Rpm)
4.343	1.723	0.02744	2121

### 4.3 Pengujian Emulator Motor Bakar

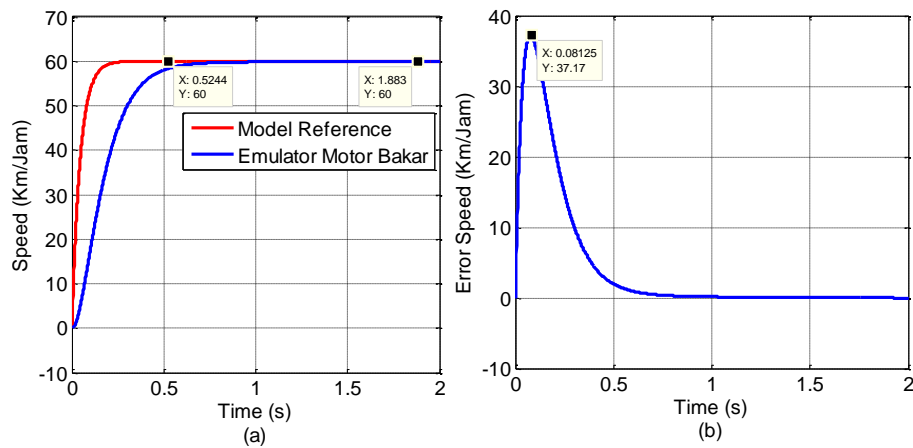
Pengujian emulator motor bakar bertujuan untuk mengetahui respon torsi dan kecepatan emulator. Pengujian pertama dilakukan dengan membandingkan respon torsi dan kecepatan emulator dengan motor bakar. Pengujian kedua dilakukan membandingkan respon kecepatan emulator dengan model referensi. Pengujian dilakukan dengan memberikan persentase bukaan *throtlle* masing-masing sebesar 54.224%. Persentase bukaan *throtlle* ini menghasilkan kecepatan 60 km/jam.

Gambar 4.10 (a) menunjukkan respon torsi emulator dan motor bakar. Respon torsi emulator dapat menyerupai respon torsi motor bakar. Nilai RMSE untuk respon torsi adalah  $4.6534 \times 10^{-4}$  N.m. Respon kecepatan emulator juga dapat mengikuti respon motor bakar. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.10 (b), dengan nilai RMSE dari kecepatan adalah 16.5074 km/jam.

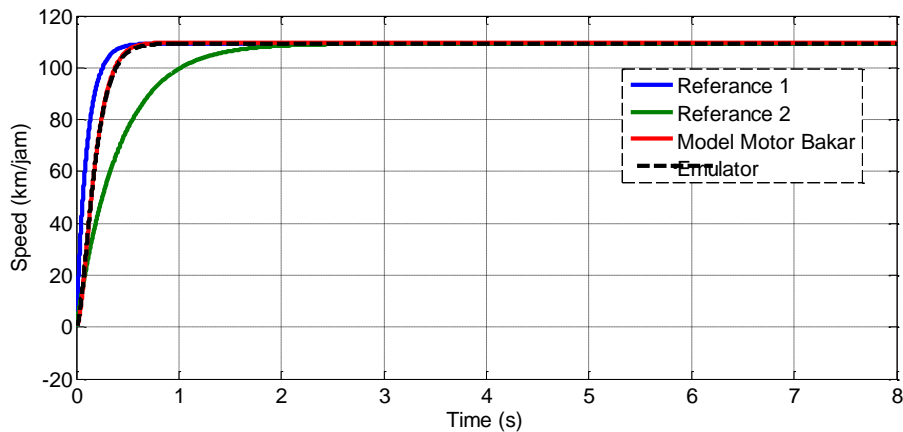


Gambar 4.10 Respon Emulator Motor Bakar (a) Torsi, (b) Kecepatan.

Respon kecepatan untuk model referensi dan emulator motor bakar ditunjukkan pada Gambar 4.11 (a). Hasil pengujian menunjukkan kecepatan emulator untuk mencapai setpoint kecepatan 60 km/jam membutuhkan waktu 1.883s, sementara waktu yang dibutuhkan model referensi yaitu 0.5244s. terdapat selisih waktu yang dibutuhkan sebesar 1.3586s. Nilai *error* terbesar terjadi pada 0.08125s, dengan RRMSE respon kecepatan < 28% . hal ini ditunjukkan pada gambar Gambar 4.11 (b).



Gambar 4.11 Respon Emulator Motor Bakar, (a) Kecepatan, (b) *Error* Kecepatan



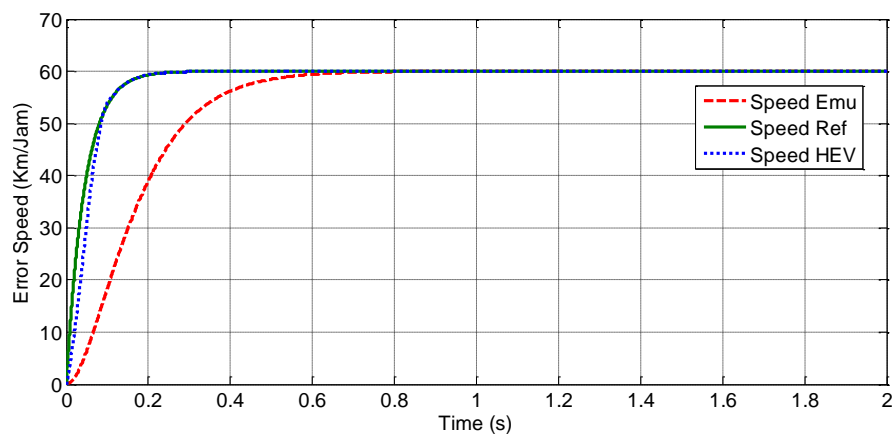
Gambar 4.12 Respon Referensi Acuan HEV

#### 4.4 Pengujian HEV

Pengujian HEV bertujuan untuk mengetahui respon kecepatan HEV dengan strategi pengaturan torsi HEV menggunakan kontroler *fuzzy*-PI. Berikut ini adalah hasil pengujian yang telah dilakukan :

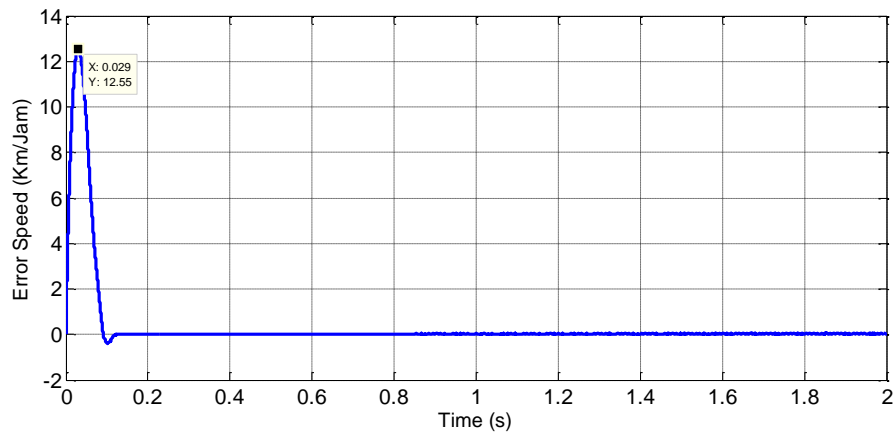
##### 4.4.1 Pengujian HEV Kondisi Akselerasi

Pengujian dilakukan dengan menerapkan metode strategi kontrol torsi yang telah dirancang. Pada pengujian diberikan *gain torque controller*  $K_p=5$ ,  $K_i=1,5$ . Respon kecepatan (Gambar 4.13) menunjukkan nilai kecepatan *steady state* 60 km/jam.



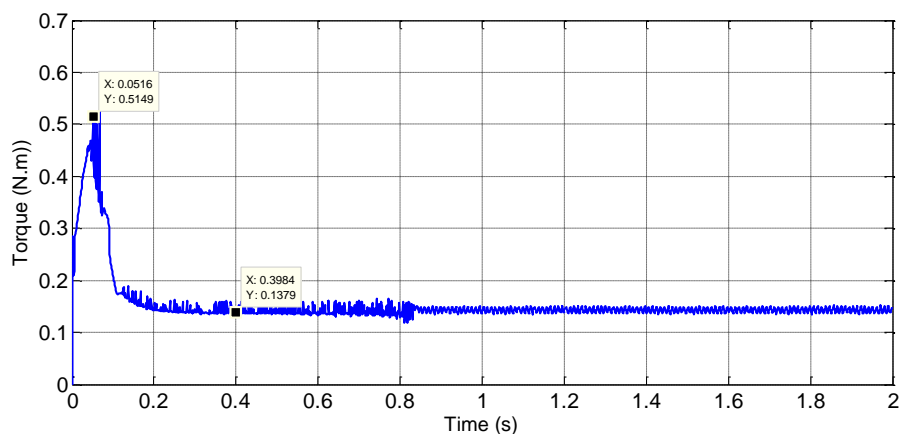
Gambar 4.13 Respon Kecepatan HEV Kondisi Akselerasi

*Error* kecepatan (Gambar 4.14) beresilasi menuju nol. Nilai *error* tertinggi terjadi pada saat HEV mulai jalan yaitu 12.66 km/jam pada detik 0.029s. *Error steady state* sebesar 0.0316 km/jam dan RRMSE respon kecepatan sebesar  $< 2\%$ .



Gambar 4.14 Respon *Error* Kecepatan HEV

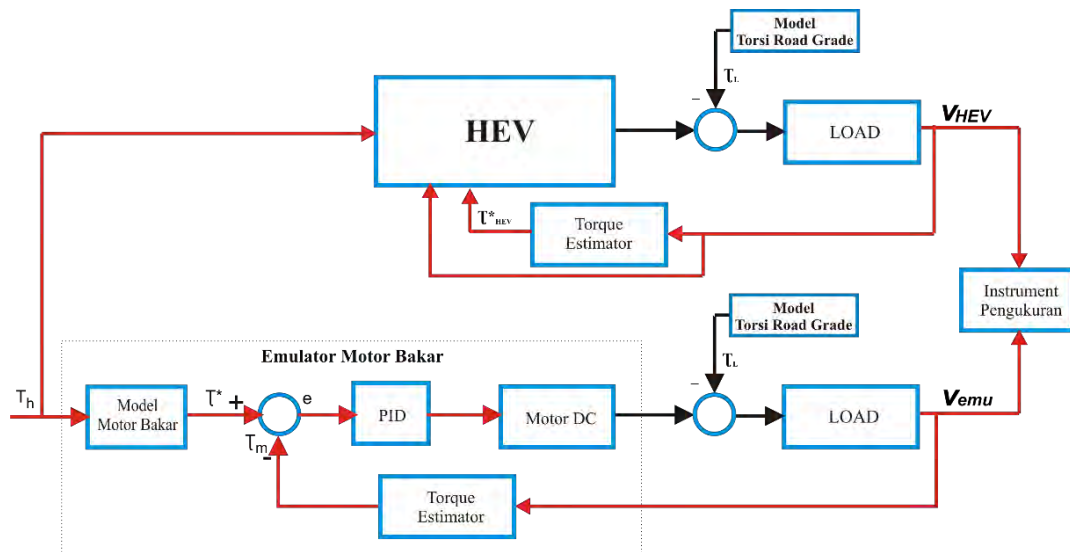
Respon torsi (Gambar 4.15) menunjukkan riak torsi dengan nilai rata-rata 0.549N. riak yang di timbulkan masih tergolong besar.



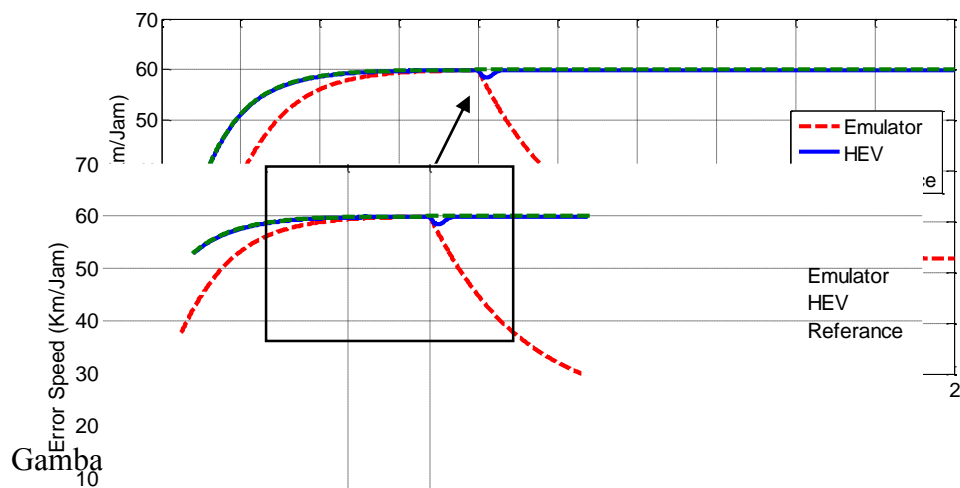
Gambar 4.15 Respon Torsi BLDCM

#### 4.4.2 Pengujian HEV Dengan Gangguan Torsi Luar

Pengujian tahap ini dilakukan dengan memberikan beban dari luar sebesar 0-0,1 N.m yang di asumsi sebagai kemiringan jalan (Gambar 4.16). Beban ini diberikan pada HEV dan emulator, kemudian hasil pengukuran dibandingkan antara HEV dan emulator. Hasil pengujian secara keseluruhan dijelaskan pada Tabel 4.2. *Gain torque controller* dipilih sebesar  $K_p=5$ ,  $K_i=1,5$ . Respon kecepatan (Gambar 4.17) merupakan pengujian ke 4 pada Tabel 4.2. Respon ini menunjukkan nilai kecepatan *steady state* sebesar 60 km/jam. Ketika diberikan beban pada waktu 0,8 s, HEV masih dapat mempertahankan performa sesuai nilai referensi.



Gambar 4.16 Pengujian HEV dengan Gangguan Torsi Luar

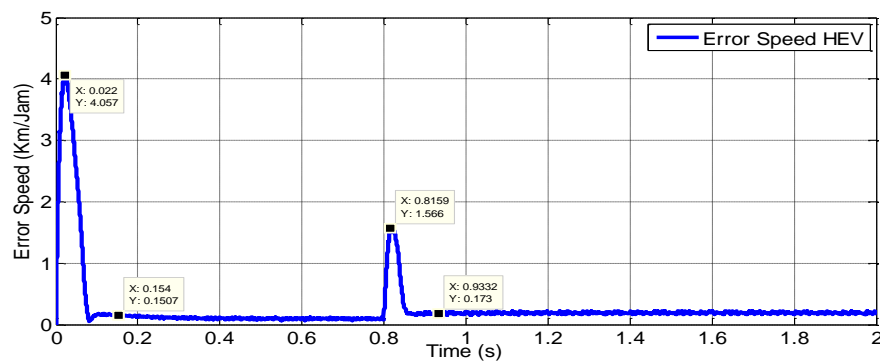


Tabel 4.2 Pengujian HEV saat diberikan Gangguan Torsi Luar

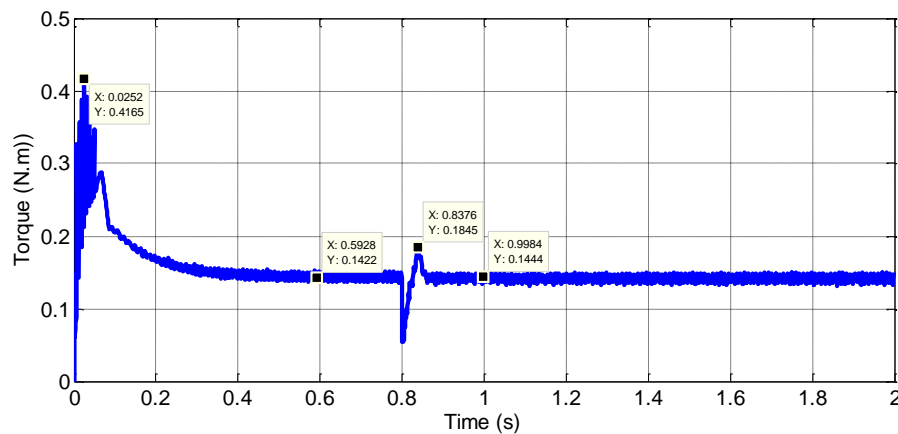
Torsi Gangguan (N.m)	Kecepatan (km/jam)	Error Rata-Rata (km/jam)	RMSE (km/jam)	RRMSE (%)
0	59,9086	$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e$ 0,1938	0,5588	0,932
0,07	59,8445	0,2488	0,5796	0,968
0,08	59,8385	0,2595	0,5882	0,983
0,09	59,8189	0,2719	0,6006	1,004
0,1	59,7974	0,2848	0,6141	1,027



Gambar 4.18 merupakan respon *error* kecepatan antara kecepatan HEV dan kecepatan referensi. Hasil perhitungan menunjukkan RRMSE respon kecepatan  $< 2\%$ . RRMSE dari dua pengujian ini tidak jauh berbeda. Nilai error terbesar pada kondisi *start* dan pada saat diberikan beban *error* terjadi sebesar 1,566 km/jam, kemudian respon *error* kembali menuju nol dan *error steady state* sebesar 0,173 km/jam.



Gambar 4.18 *Error* Kecepatan HEV dengan Uji Gangguan

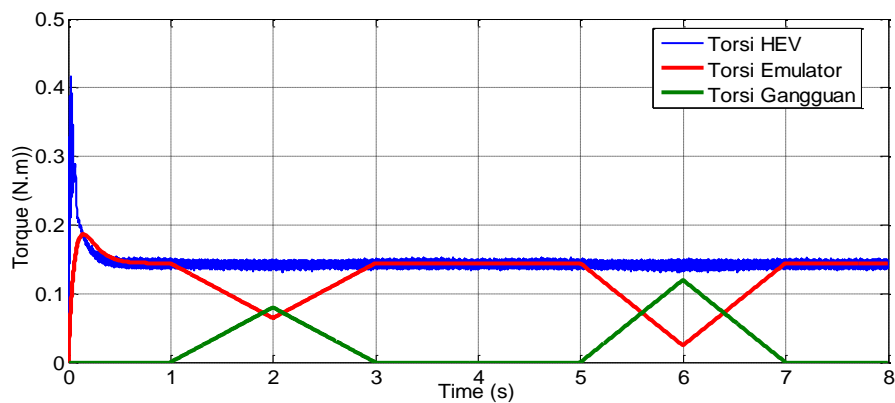


Gambar 4.19 Respon Torsi HEV

Respon torsi HEV (Gambar 4.19) menunjukkan riak torsi dengan nilai saat *steady state* 0,1422 N.m sebelum diberikan beban. Pada waktu 0.8 s nilai torsi berubah karena pemberian beban (1845 N.m) dan nilai rata-rata torsi HEV 0,1444 N.m. Torsi HEV merupakan torsi gabungan torsi ICE dan BLDCM, sehingga nilainya lebih besar.

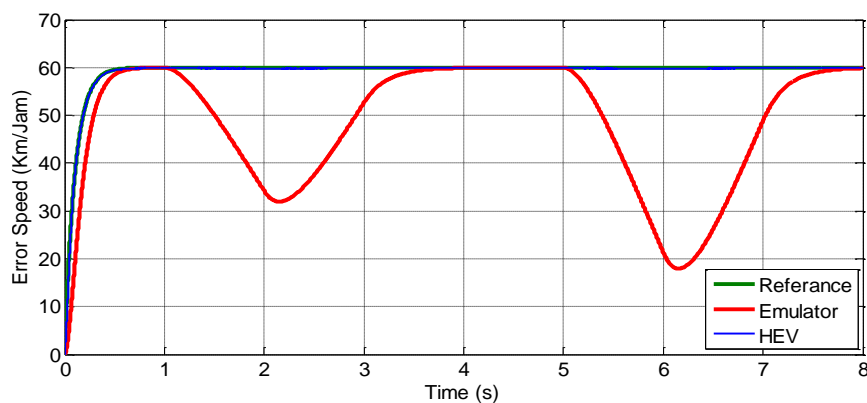
Tahap selanjutnya dilakukan pengujian dengan memberikan gangguan berupa beban yang berubah-ubah, tahap pengujian sama dengan pengujian sebelumnya (Gambar 4.16). Pada kondisi sebenarnya berupa perubahan kondisi

jalan. Pengujian ini diuji dengan memberikan torsi gangguan dengan nilai yang sama pada emulator dan HEV. Gangguan ini berupa dua respon berbentuk segi tiga yang berbeda nilai (0,08 dan 0,12 N.m). Hasil pengujian diberikan pada Gambar 4.20. Respon tersebut menunjukkan kontroler fuzzy-PI berfungsi untuk pengaturan torsi HEV, sehingga penggerak HEV dapat memberikan torsi yang dibutuhkan HEV.

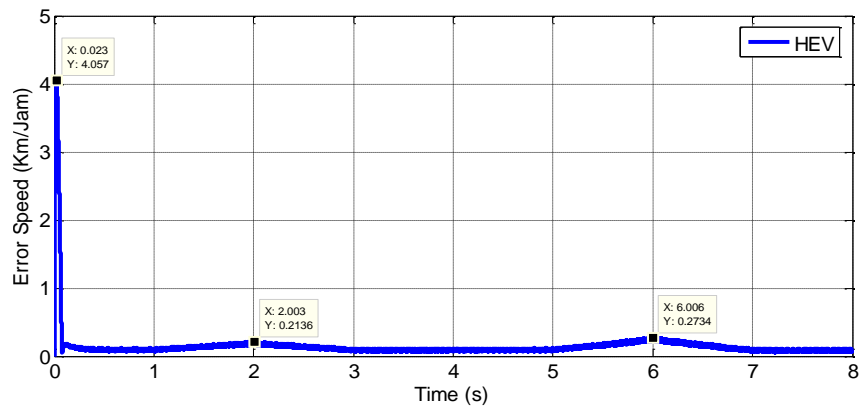


Gambar 4.20 Respon Torsi HEV dan Torsi Gangguan

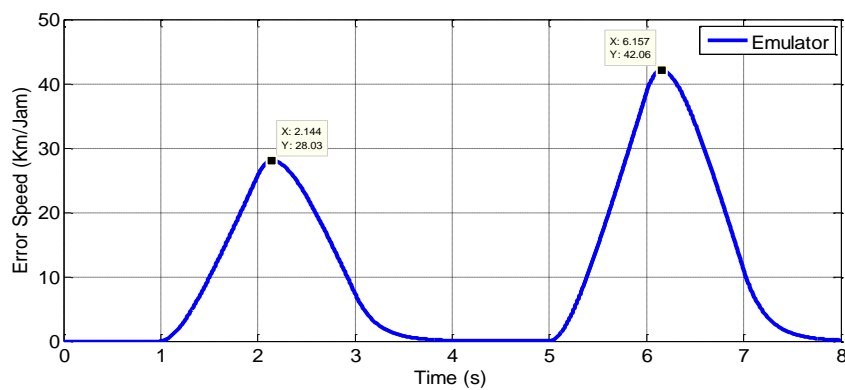
Gambar 4.21 menjelaskan respon kecepatan HEV ketika ada gangguan yang berubah-ubah. Pada gambar ditunjukkan bahwa HEV dapat mempertahankan kecepatan dan mengikuti respon referensi yang diberikan. *Error* rata-rata antara respon HEV dan model referensi sebesar 0,1463 km/jam dan RRMSE sebesar <1%. Respon *error* kecepatan ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.21 Respon Pengujian Kecepatan HEV dengan Beban Bervariasi

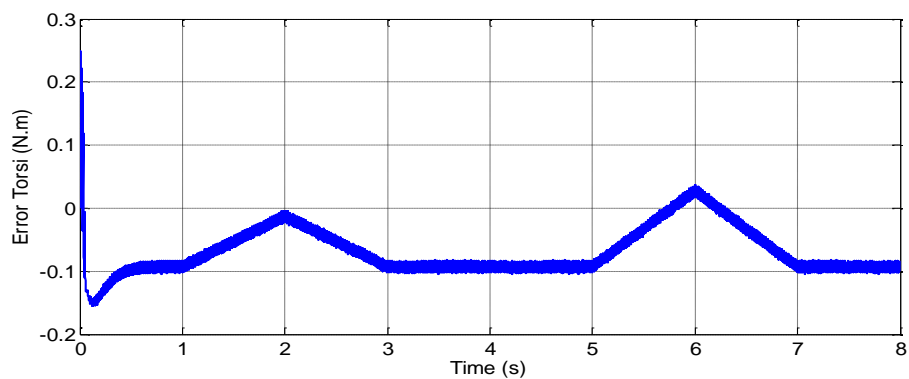


Gambar 4.22 Respon *Error* Kecepatan HEV Saat Beban Bervariasi



Gambar 4.23 Respon Error Kecepatan Emulator Saat Beban Bervariasi

Respon *error* emulator ditunjukkan pada Gambar 4.23. Dari respon tersebut ditunjukkan, *error* terbesar terjadi pada gangguan kedua dengan nilai 42,06km/jam. Pada gangguan pertama nilai *error* tertinggi sebesar 28,03 km/jam. Nilai *error* rata-rata antara emulator yang diberikan gangguan dan tidak, sebesar 10,3868 km/jam. RRMSE antara kedua respon < 27%.



Gambar 4.24 Respon *Error* Torsi HEV dan Emulator

RMSE dari torsi HEV dan torsi emulator sebesar 0.0781 N.m yang ditunjukkan pada Gambar 4.24, ini terjadi ketika ada gangguan dari torsi luar. Hasil pengujian dijelaskan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian HEV dengan Beban Bevariasi

Torsi Luar (Perubahan Kondisi Jalan) N.m	Error rata-rata (km/jam) $\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e$		RRMSE (%)	
	Emulator	HEV	Emulator	HEV
0,08 & 0,12	10,3868	0,1463	< 27%	< 1%

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa terhadap hasil penelitian, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- a. Dari pengujian dihasilkan HEV dapat berakselerasi (0-60 km/jam) dalam waktu  $\leq 5$  detik dan respon kecepatan dapat mengikuti model referensi dengan nilai *error steady state* sebesar 0.0316 km/jam dan RRMSE respon kecepatan  $< 2\%$ .
- b. Strategi kontrol torsi HEV yang diterapkan dengan cara memaksimalkan kerja BLDCM menggunakan logika *fuzzy*-PI dapat bekerja dengan baik dilihat dari hasil pengujian pada kondisi akselerasi maupun saat diberikan gangguan.
- c. Pada kondisi kendaraan jalan dengan diberikan gangguan torsi luar performa kendaraan masih tetap mengikuti kurva referensi dengan nilai *error steady state* 0,1506 km/jam dan RRMSE respon kecepatan  $< 2\%$ .

#### **5.2 Saran**

Pengembangan penelitian selanjutnya ditambahkan perancangan kondisi *charging* dan *discharging* baterai sehingga sistem HEV menjadi lebih kompleks dan efektif.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

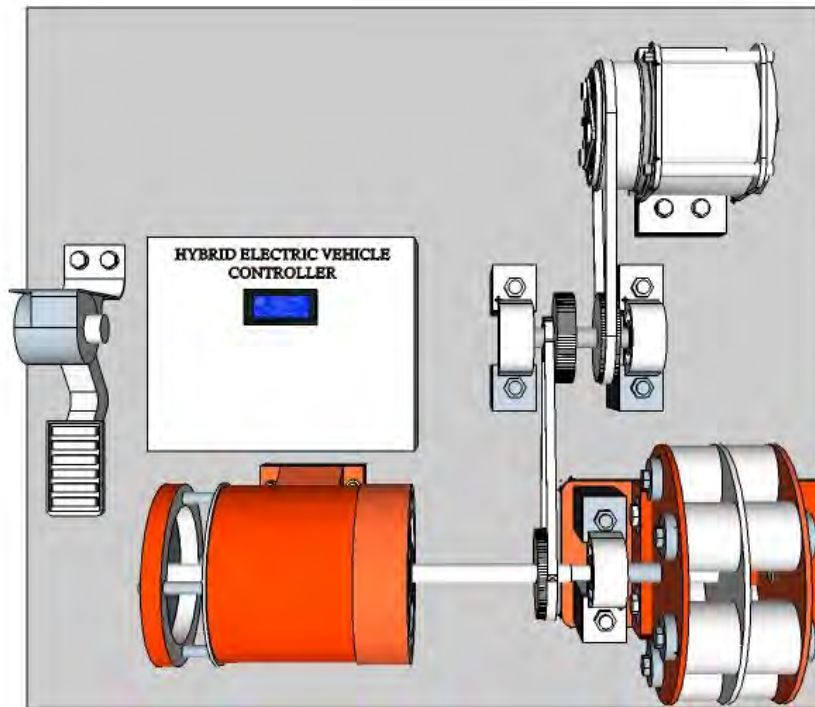
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. Chris dan Gao, *Hybrid Electric Vehicles, Principles and Applications with Practical Perspective*, New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [2] B. Adel, Z. Youtong dan S. Shuai, "Parallel HEV Hybrid Controller Modeling for Power Management," *Word Electric Vehicle Journal*, vol. 4, pp. 190-196, 2010.
- [3] Z. Yi, L. Heping dan W. Huabin, "Torque Control Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles using Fuzzy Logic," *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, vol. 10, no. 4, pp. 116-125, 2011.
- [4] B. Lee dan M. Ehsani, "Advanced BLDC Motor Drive for Cost and High Performance Propulsion System in Electric and Hybrid Vehicles," dalam *Electric Machines and Drives Conference (IEMDC) IEEE International*, 2001.
- [5] Fahrul, "Prancangan Konstruksi Self Commutation Multistage Axial Fild BLDC Motor dengan Pengaturan Kecepatan Menggunakan Sliding Mode Control (SMC)," Tesis, ITS, Surabaya, 2016.
- [6] V. Geetha dan S. Thangavel, "Performance Analysis of Direct Torque Controlled BLDC motor using Fuzzy Logic," dalam *International Conference on Uncertainty Reasoning and Knowledge Engineering. IEEE*, 2016.
- [7] J. Zhao dan Y. Yu, *Brushless DC Motor Fundamentals Application Note*, MPS the Future of Analog IC Technology, 2014.
- [8] G. Massimo, *DC Motors and Generator*, Polytecnic University of Milan, Italy, 2000.
- [9] A. R. Annisa, "Strategi Pengaturan Torsi Pada Hybrid Electric Vehicle (HEV) Menggunakan Metode Neuro-Fuzzy Prediktif dengan Multi Input Neuro-Fuzzy Invers Model," Surabaya, 2015.
- [10] P. J. Ing, "Experimental Identfication of Stabile Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods," dalam *Conference Studenske Tvuurci*, Cinnosti, 2009.
- [11] S. Kusumadewi dan H. Purnomo, *Aplikasi Logika Fuzzy Untuk Pendukung Keputusan*, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [12] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Application*, USE: Wiley, 2004.

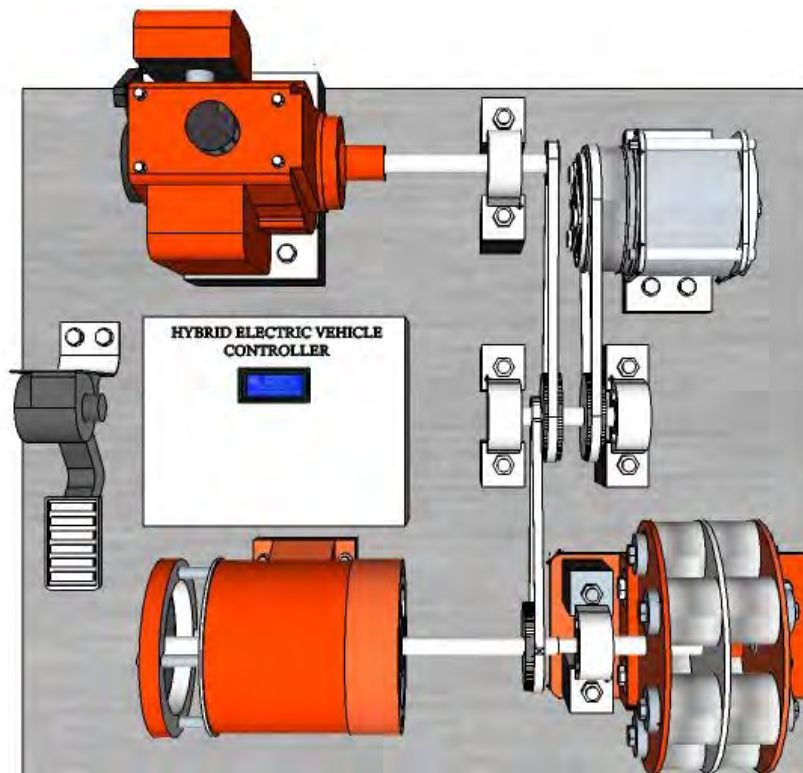
*Halaman ini sengaja dikosongkan*



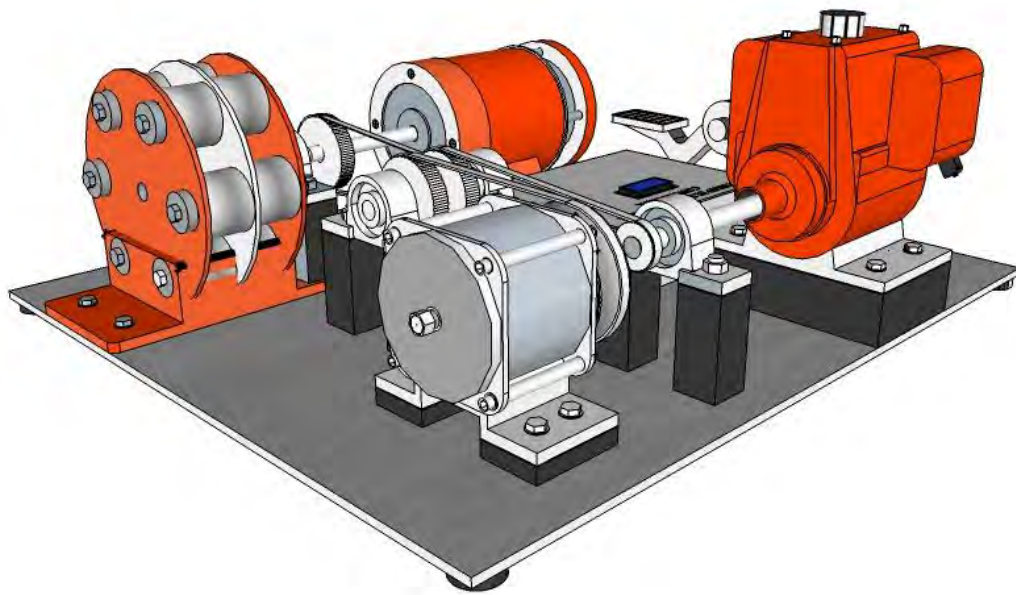
## Lampiran 1. Gambar Rancangan Mekanik Simulator HEV



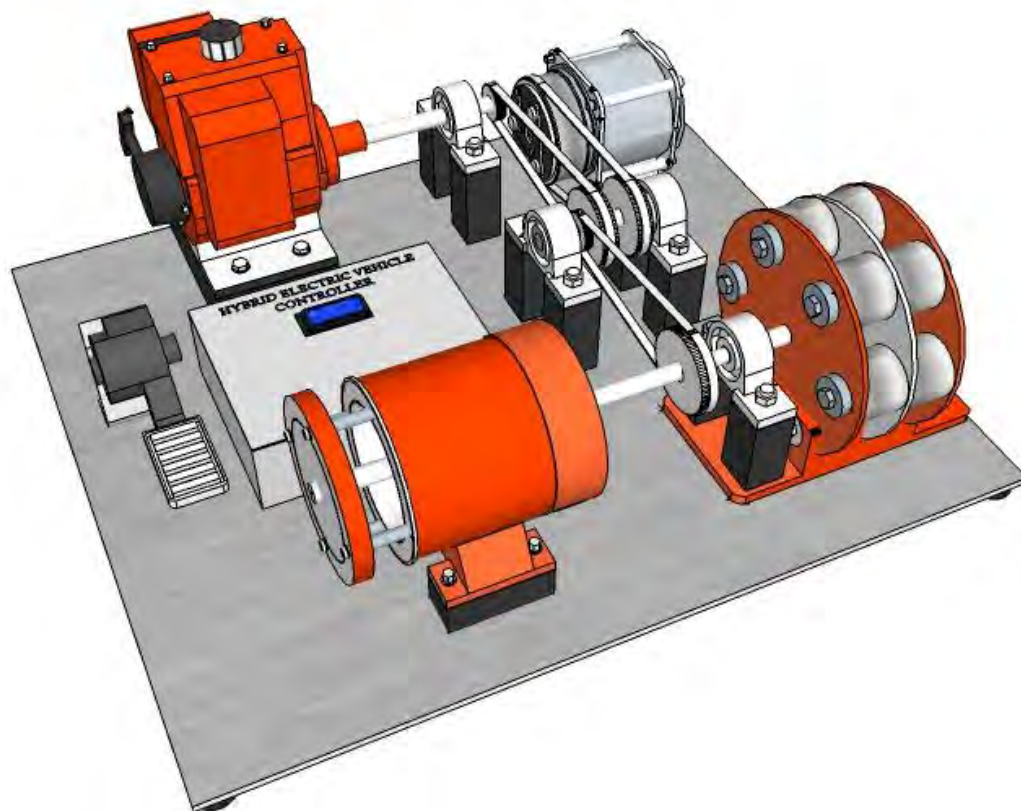
(a) Tampak Atas tanpa Motor Bakar



(b) Tampak Atas dengan Motor Bakar

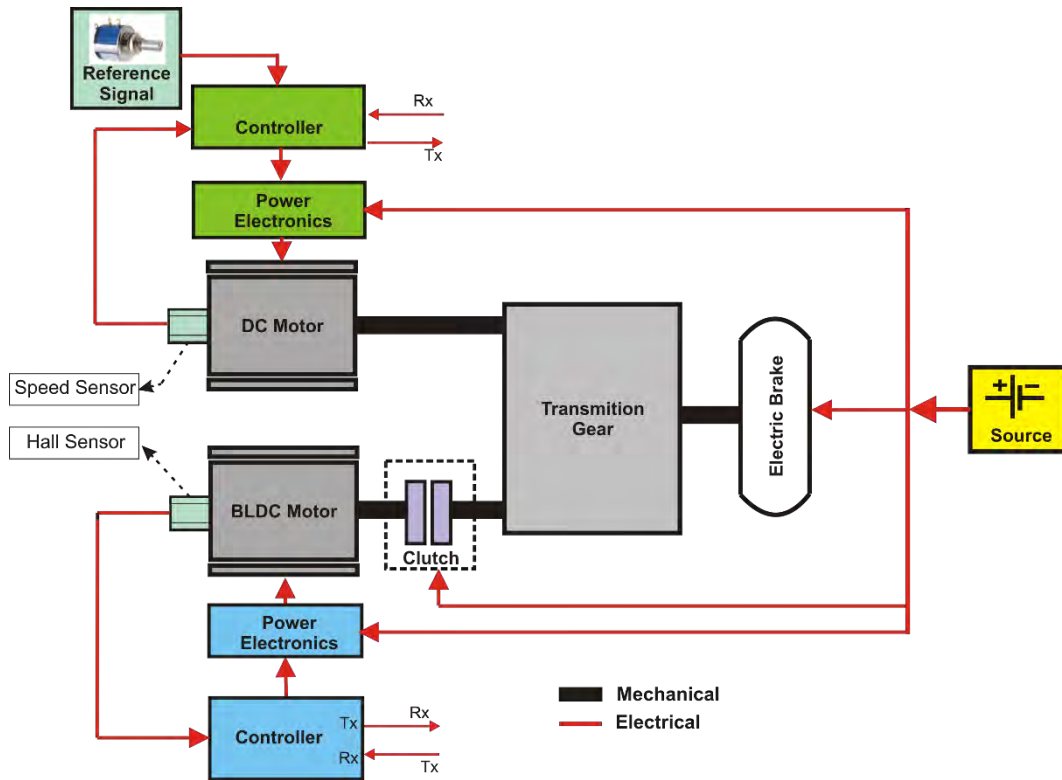


(c) Tanpak Samping Kanan

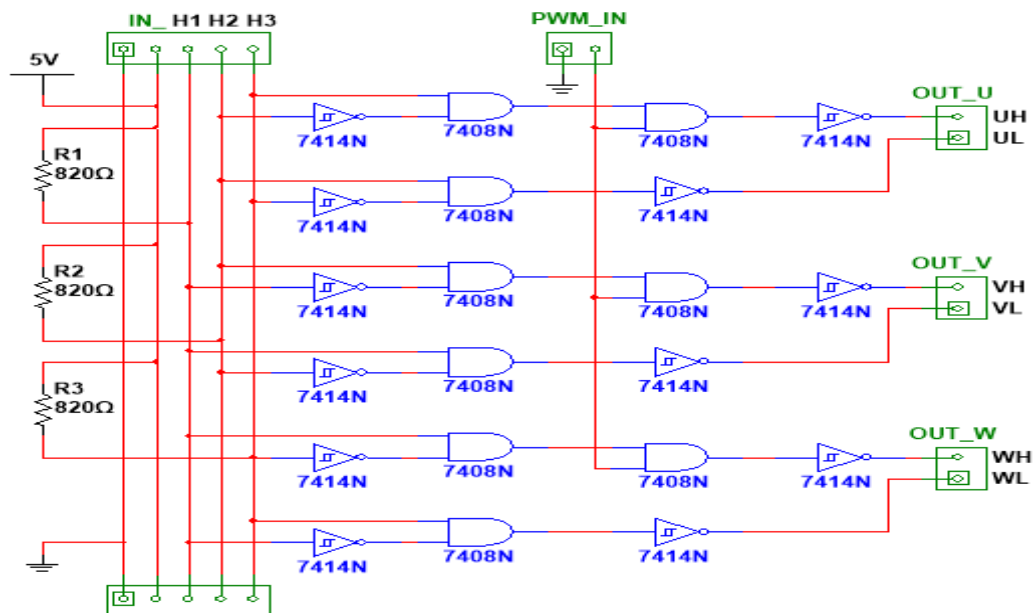


(d) Tanpak Samping Kiri

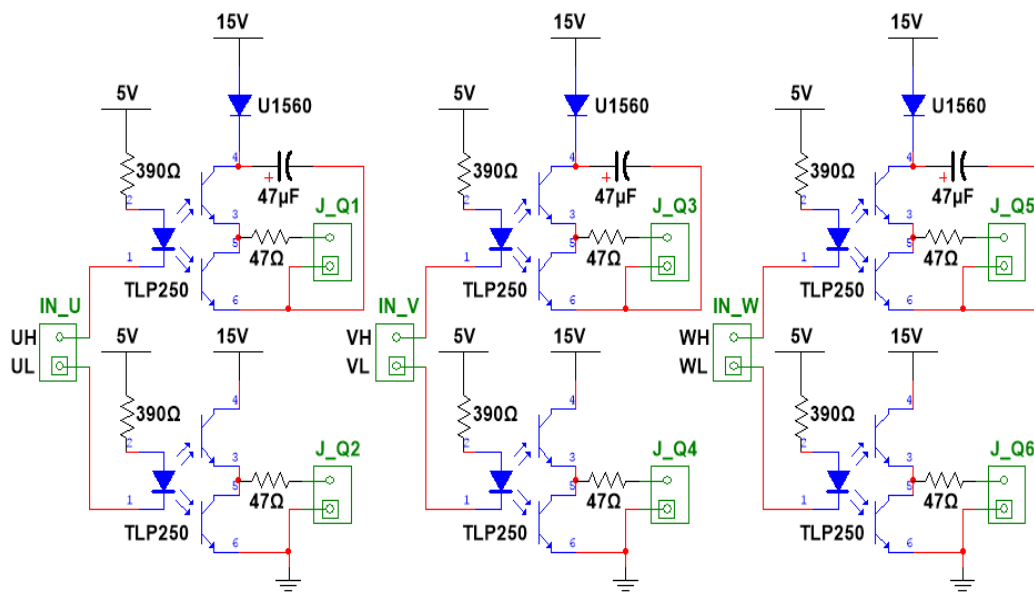
## Lampiran 2. Gambar Rancangan Elektronik Simulator HEV



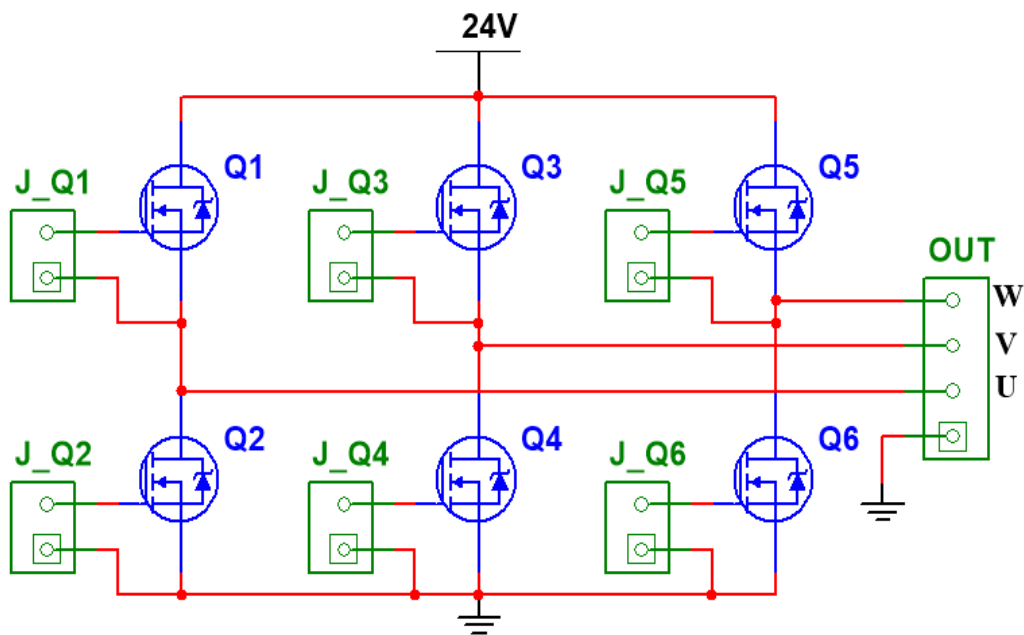
(a) Rancangan Keseluruhan



(b) Desain Kombinasi Gerbang Logika *Self Commutation*

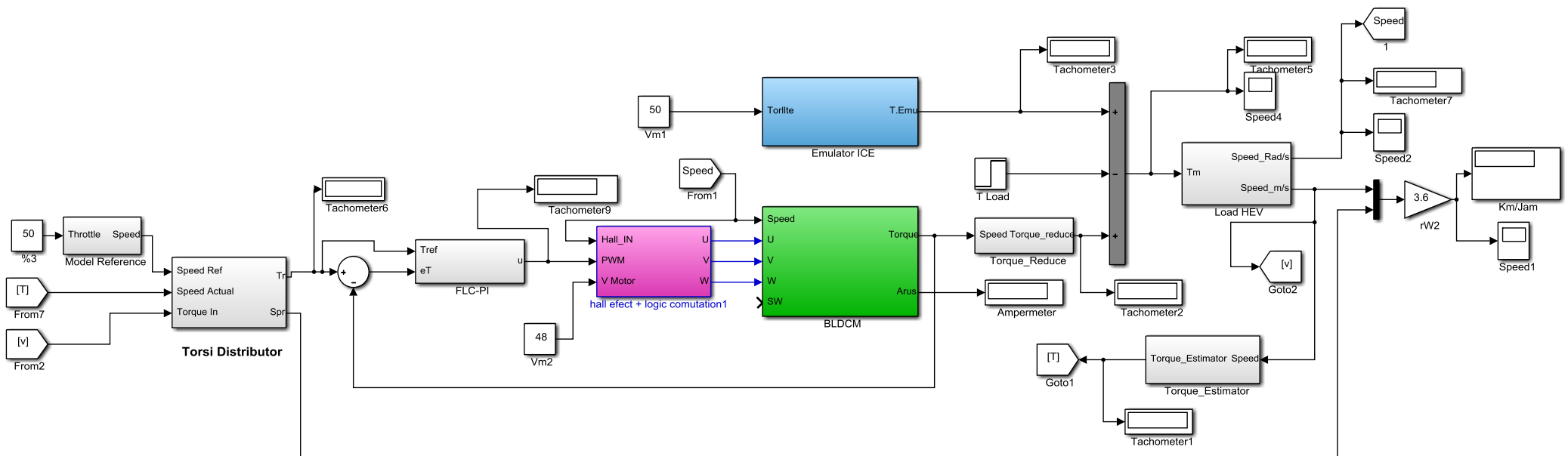


(c) Desain Rangkaian Pemacu Mosfet *Power Electronic*



(d) Desain *Power Electronic*

### Lampiran 3. Simulasi Simulator HEV dengan Matlab



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## RIWAYAT HIDUP



**Yosi Riduas Hais** lahir pada tanggal 21 Januari 1991 di Yogyakarta. Pendidikan Dasar di SD N0. 93/III Mukai Mudik pada tahun 2004, SMP di SMPN 1 Gunung Kerinci, Jambi, pada tahun 2007. Pendidikan SMK di Jurusan Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik SMKN 2 Kota Sungai Penuh, Jambi, pada tahun 2010. Gelar Serjana Sains Terapan (S.ST) di Prodi Teknik Elektro Industri Universitas Negeri Padang pada tahun 2015. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi Strata-2 di Jurusan Teknik Elektro-FTE Institut Teknologi Sepuluh November pada tahun 2015 dan berhasil menyelesaikan pendidikan Magister pada September 2017.

Prestasi yang pernah diraih: Juara 1 Lomba LKS SMK Tingkat Provinsi Jambi Bidang *Commercial Wiring* tahun 2009. Peserta Lomba LKS SMK Tingkat Nasional Ke XVIII Bidang *Commercial Wiring* tahun 2010. Juara 2 Kompetisi Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) Bidang Pengabdian Masyarakat Tingkat UNP tahun 2012. Penyaji Tingkat Nasional Bidang PKMM Pada Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional (PIMNAS) XXVI tahun 2013.

**Penulis**  
yosiriduashais@gmail.com

*Halaman ini sengaja dikosongkan*